ISN-3 1444 4

Conseil national de recherches Canada | National Research Council Canada

ISN-3 1444 4

TM-WE-005

ÉNERGIE ÉOLIENNE

RAPPORT TECHNIQUE

PROGRAMME DE L'ÉNERGIE

LE PROGRAMME CANADIEN DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

VUE D'ENSEMBLE ET ÉTAT D'AVANCEMENT

M.S. CHAPPELL

AOÛT 1981

LA PRÉSENTE DÉFINITION TECHNIQUE EST PUBLIÉE À TITRE D'INFORMATION. ELLE EST DE NATURE PRÉLIMINAIRE ET POURRAIT ÊTRE RÉVISÉE ET DÉVELOPPÉE. ELLE NE SERA PAS MISE À JOUR.

Canada

TM-WE-005

PROGRAMME CANADIEN DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

VUE D'ENSEMBLE ET ÉTAT D'ADVANCEMENT

M.S. CHAPPELL
GESTIONNAIRE
ÉNERGIE ÉOLIENNE
PROGRAMME DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE
CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA

AOÛT 1981

D'autres exemplaires du présent rapport peuvent être obtenus à l'adresse ci-après:

Publications
Conseil national de recherches du Canada
M-58, Chemin de Montréal
Ottawa, Ontario K1A 0R6

(Also available in English)

TABLE DES MATIÈRES

Page

LISTE DES FIGURES v

LIST DES TABLEAUX v

RÉSUMÉ vii

1.0 INTRODUCTION 1

2.0 CADRE ORGANISATIONNEL DE LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUES AU FÉDÉRAL 3

2.1 Coordination de la R et D énergétique au fédéral . . . 3

2.2 Subventions fédérales à la R et D énergétiques 4

3.0 PROGRAMME DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE 6

3.1 Rétrospective du programme de RDEE 6

3.2 Objectifs du programme de RDEE 6

3.3 Portée et orientation du programme de RDEE 7

3.3.1 Types d'éolienne 7

3.3.2 Formes de l'énergie utilisable 8

3.3.3 Échelle des systèmes 9

3.4 Applications, apports et effets sur l'industrie 9

3.5 Structure du programme de RDEE 11

3.6 Communication des résultats du programme de RDEE . . . 13

4.0 ÉTAT DES PROJETS EN COURS 15

4.1 Évaluation des ressources et des sites d'implantation . 15

4.1.1 Normalisation et mise en forme des données existantes 16

4.1.2 Carte nationale de l'énergie éolienne 16

4.1.3 Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude et du temps 17

4.1.4 Effet des caractéristiques locales du terrain . 18

4.1.5 Modèle des petites zones pour l'évaluation des sites d'implantation 19

4.1.6 Prévision sur le vent à long terme par des méthodes statistiques 20
4.1.7 Décroissance du sillage des éoliennes 20
4.1.8 Mesures de la structure des vents au-dessus des terrains ruraux 20
4.1.9 Projet de prospection éolienne du CNRC 20
4.1.10 Techniques du cartographie de l'énergie éolienne 21
4.1.11 Sélection du site pour ÉOLE 21
4.1.12 Programme de prévision de la production énergétique 23
4.2 Recherche et développement de la technologie 23
4.2.1 Calcul du rendement et des charges aérodynamiques 23
4.2.2 Caractéristiques du profil aérodynamique . . . 24
4.2.3 Analyse dynamique des structures 24
4.2.4 Analyse des EAV 25
4.2.5 Essais en soufflerie 26
4.2.6 Aspects écologiques 28
4.2.7 Normes 28
4.3 Essais sur le terrain et aide technique à l'industrie 28
4.3.1 Applications à des fins spéciales 29
4.3.2 Systèmes hybrides éoliens-diesels 33
4.3.3 Installations de 50 kW reliées au réseau . . . 34
4.3.4 Installation des Iles de la Madeleine 36
4.4 Projet ÉOLE 38
4.4.1 Historique 38
4.4.2 Objectifs 40
4.4.3 Esquisse du projet 41
4.4.4 Spécifications préliminaires 42

5.0 CONCLUSION 44

ANNEXE A: RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE 46

LISTE DES FIGURES

1 Subventions fédérales à la R et D énergétiques 4
2 Subventions à la recherche et développement des énergies renouvelables 5
3 Densité de l'énergie éolienne annuelle moyenne à 30 mètres d'altitude 17
4 Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude et du temps 18
5 Densité de l'énergie éolienne annuelle moyenne à 50 m d'altitude 22
6 Centrale EAV à Système "A" de Bristol sur de la glace à la dérive dans la mer de Beaufort (Nov. 76) 30
7 EAV de 50 kW couplée au réseau à Victoria (C.-B.) 35
8 EAV de 230 kW couplée au réseau aux Iles de la Madeleine (Québec) 37
9 Performance de l'EAV des Iles de la Madeleine 39
10 ÉOLE - Spécifications préliminaires 42

LISTE DES TABLEAUX

I Groupes de R et D du governement fédéral 3
II Marché potentiel pour les grands SCEE 11
III Spécifications des systèmes aéroelectriques de Bristol . . . 31
IV Installations aéroélectriques expérimentales à des fins spéciales 33
V Installations d'essai sur le terrain de systèmes aéroélectriques de 50 kW reliés au réseau 35
VI Spécifications préliminaires du projet ÉOLE 43

RÉSUMÉ

La recherche canadienne sur l'énergie éolienne a débuté au laboratoire d'Aérodynamique des basses vitesses du Conseil national de recherches en 1966. Les premiers efforts, orientés vers la création d'un système permettant la production de petites quantités d'électricité dans les zones isolées, ont conduit à la réinvention de l'éolienne à axe vertical de type Darrieus (EAV), brevetée en 1927 par Georges Darrieus en France.

Après l'embargo pétrolier de 1973, les diverses activités de R et D sur l'énergie éolienne (RDEE) ont été regroupées au sein d'un programme fédéral global de R et D énergétique sous la direction du Groupe d'étude sur les énergies renouvelables. Parallèlement, la recherche s'est portée sur des systèmes plus gros susceptibles de produire des quantités importantes d'énergie à des prix compétitifs sur le plan national. Le système aérogénérateur EAV a ces qualités et reste le pilier du programme canadien de RDEE financé actuellement au coût de 1,5 million de dollars par an.

Les éléments du programme de RDEE sont:

- Évaluation des ressources et des meilleurs sites d'implantation
- Recherche et développement de la technologie
- Expérimentation sur le terrain et aide technique à l'industrie

Des études poussées montrent que les EAV de l'ordre du mégawatt constituent la meilleure option de production rentable d'aéroélectricité à l'échelle des compagnies de service. ÉOLE, projet conjoint du Conseil national de recherches et d'Hydro-Québec visant la conception, la construction et l'évaluation d'un prototype d'aérogénérateur de l'ordre du mégawatt, permettra de confirmer les méthodes de conception et d'acquérir de l'expérience concernant le fonctionnement du matériel en grandeur réelle.

Le présent rapport esquisse la structure administrative et technique du programme de RDEE et revoit les points saillants des projets en cours.

M.S. Chappell
Gestionnaire, RDEE.

1.0 INTRODUCTION

Les Canadiens sont de gros consommateurs d'énergie avec une consommation annuelle d'énergie de 10 EJ, une demande permanente supérieure à 10 kW per capita. Plus de cinquante pour cent de cette consommation provient du pétrole et du gaz naturel. Avec les prix mondiaux actuels du pétrole, le coût de l'énergie consommée se chiffre à environ un tiers du PNB canadien. Les importations (nettes) du Canada sont d'environ 15% de sa consommation de pétrole et se montent à $5 milliards par an.

Il ne fait pas de doute que parmi les options énergétiques qui s'offrent au Canada face à sa dépendance vis-à-vis des sources d'énergie épuisable telles que les combustibles fossiles, le recours aux énergies renouvelables présente d'indéniables avantages. Dans une société toutefois habituée à profiter des sources d'approvisionnement hautement concentrées, abondantes et de grands rendements, il faut reconnaître que les énergies renouvelables exhibent de fâcheuses particularités, par exemple:

a) Leur potentiel énorme, mais encore mal connu, demeure fortement lié aux économies relatives des sources d'énergies nouvelles et classiques.

b) Elles sont d'une variabilité aléatoire qui nécessite pour répondre au fardeau de la demande, la mise en place d'installations de stockage aussi peu onéreuses que possible ou la restriction des applications aux charges quasi-invariables dans le temps.

c) Leurs sources sont diffuses et requièrent un matériel de conversion lourd et des investissements de capitaux considérables pour une production très modeste.

d) Elles sont d'une intensité capitalistique telle que les coûts de l'énergie sont extrêmement sensibles aux fluctuations des coûts de l'investissement.

e) Les techniques de conversion ne sont pas encore suffisamment au point pour dissiper les doutes planant sur la fiabilité des approvisionnements et son incidence future sur les investissements.

f) Les disparités géographiques écartent toute possibilité d'application des résultats de la R et D à l'ensemble du Canada, sans parler de l'étranger.

g) Et enfin, leur exploitation est sujette à des pressions sociales de groupes politiques ou voués à la défense de l'environnement qui ne tiennent pas nécessairement compte des réalités.

Les efforts de R et D sur les énergies renouvelables ne doivent donc pas se limiter à établir la faisabilité techniques de l'utilisation d'une source énergétique ou d'un dispositif donné de

avec la disponibilité régionale, détermineront finalement la contribution possible des énergies renouvelables aux futurs approvisionnements énergétiques du Canada.

L'énergie éolienne a ses avantages et ses inconvénients comme les autres sources d'énergie renouvelables. Bien que les moulins à vent aient été utilisés bien avant le seizième siècle, leur technologie a cessé d'évoluer avec l'avènement du moteur à combustion interne et de la découverte du supercarburant: le pétrole. Maintenant l'aérodynamique et l'ingénierie modernes se tournent vers les éoliennes dans le but d'en faire des systèmes producteurs d'énergie éolienne rentables.

Ce présent rapport donne un aperçu du programme canadien de recherche et développement sur l'énergie éolienne (RDEE). L'état des projets en cours est présenté dans le cadre d'une rétrospective des objectifs, de l'historique, de la structure et de l'intégration de ce programme parmi d'autres programmes fédéraux de recherche énergétique.

2.0 CADRE ORGANISATIONNEL DE LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE AU FÉDÉRAL

2.1 Coordination de la recherche et développement énergétique au fédéral

L'embargo pétrolier décrété par les pays du Moyen-Orient, suivi de l'ascension rapide des prix du pétrole en 1974, a attiré l'attention sur la dépendance croissante du Canada vis-à-vis des sources épuisables de pétrole domestique et étranger. Afin d'élaborer d'autres solutions pour équilibrer l'offre et la demande énergétiques futures du Canada, le gouvernement a créé le Comité interministériel sur la recherche et le développement énergétiques (CIRDE) afin de coordonner les activités fédérales dans ce domaine.

Sous la responsabilité du CIRDE, la R et D énergétique, parrainée par le gouvernement fédéral, a été confiée à cinq principaux Groupes (Tableau I), chacun relevant d'un ministère, ou d'une agence, considéré compétent dans ce domaine technique. Le Conseil national de recherches (CNRC) s'est vu confier la responsabilité de la coordination du Groupe sur les énergies renouvelables.

Tableau I: Groupes de R et D du gouvernement fédéral

Groupes de R et D sur l'énergie	Organisme coordonateur
I Économies d'énergie	EMR
II Combustibles fossiles	EMR
III Énergie nucléaire	EACL
IV Énergies renouvelables	CNRC
V Transport et transmission de l'énergie	MT

La politique et la stratégie en matière d'énergie, qu'elle qu'en soit la forme, restent du ressort exclusif du Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources du Canada (EMR).

Au sein de chaque Groupe d'étude sur la R et D énergétique, les agences responsables se sont vu confier la gestion des programmes individuels réalisés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de leur service.

Des six programmes relevant du groupe d'étude sur le R et D des énergies renouvelables, le CNRC est spécifiquement responsable de la gestion de cinq d'entre eux:

Énergie hydraulique
Énergie solaire
Énergie de la biomasse
Énergie éolienne
Énergie de la tourbe

Le sixième programme des énergies renouvelables, portant sur l'énergie géothermique, est administrée par la Direction de la physique du globe du Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources du Canada (DPG/EMR).

2.2 Subventions fédérales à la R et D énergétiques

Le financement global par le gouvernement fédéral de chacun des cinq Groupes d'étude sur la R et D énergétiques depuis 1974-75 est représenté à la figure 1. L'augmentation par un facteur de vingt de l'aide à la R et D sur les énergies renouvelables au cours de cette période est très évidente comme l'est la poursuite et l'importance de l'aide à la recherche en énergie nucléaire. Ces chiffres comprennent les dépenses des ministères ainsi que les fonds accordés spécifiquement à la R et D énergétiques par le CIRDE et (en 1981/1982) le programme énergétique national (PEN).

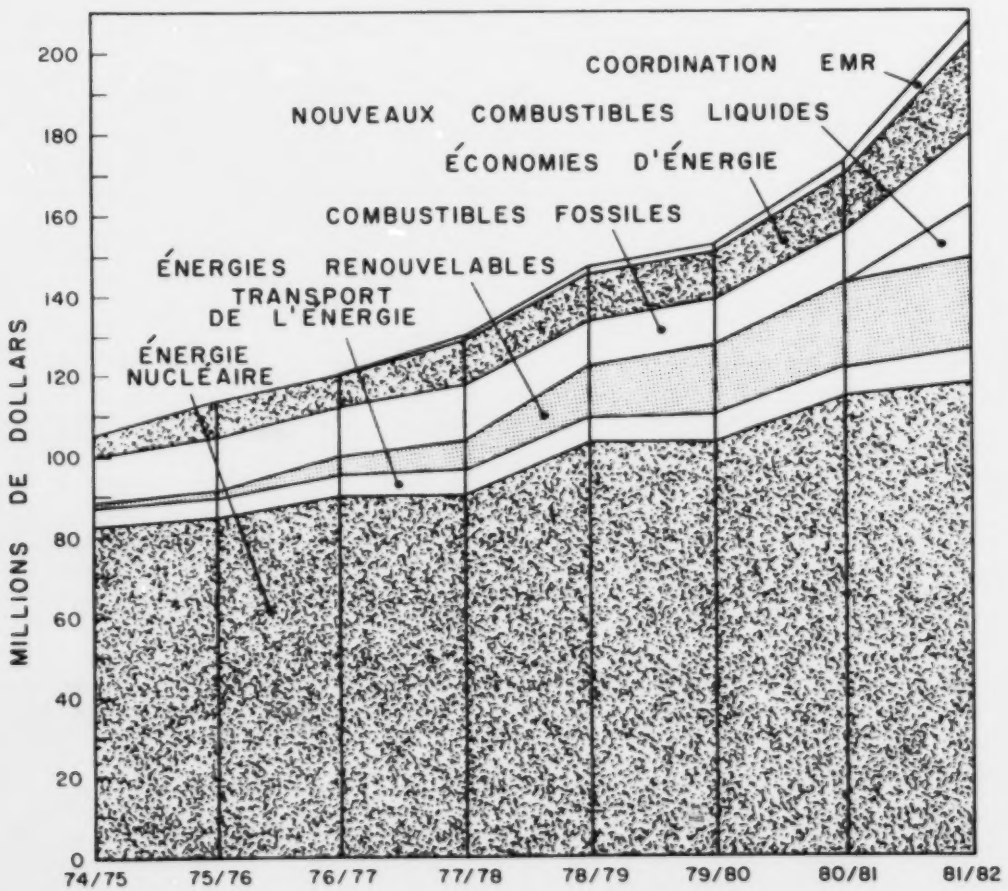


Figure 1 Subventions fédérales à la R et D énérgétiques

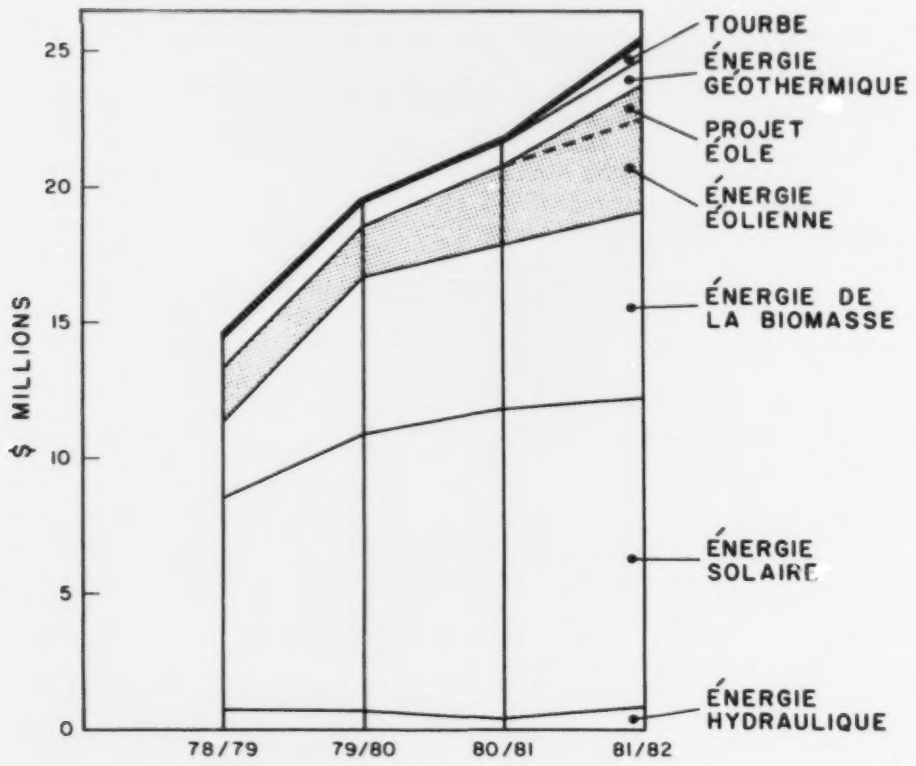


Figure 2: Subventions à la recherche et développement des énergies renouvelables

La figure 2 illustre la proportion des fonds alloués à chacun des cinq programmes du Groupe d'étude sur la R et D des énergies renouvelables au cours des quatre dernières années financières. De toute évidence, l'aide la plus important est consacrée à l'énergie solaire et à l'énergie de la biomasse, reflétant les grandes possibilités escomptées dans ces domaines à court terme. Des $25 millions fournis annuellement par le fédéral à la R et D sur les énergies renouvelables, le programme d'énergie éolienne en reçoit environ $3,5 millions par an (c'est-à-dire environ 15%), dont la moitié provient des ministères eux-mêmes et le reste des fonds du CIRDE et du PEN. L'augmentation, représentée par la surface au-dessus de la ligne pointillée, pour 1980 à 1982 correspond à l'aide consacrée par le gouvernement au projet d'un aérogénérateur à axe vertical de l'ordre du mégawatt: ÉOLE.

3.0 PROGRAMME DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

3.1 Rétrospective du programme RDEE

La recherche appliquée sur de petites éoliennes pouvant capter l'énergie du vent et stocker l'énergie utilisable a commencé au CNRC en 1966 à la suite de demandes formulées par le ministère des Communications concernant des sources d'alimentation autonomes pour des stations-relais de télécommunication et des aides à la navigation. Les recherches fondamentales en aérodynamique faites par Templin, South et Ranji au laboratoire d'Aérodynamique des basses vitesses de l'Établissement aéronautique national (EAN) ont permis le développement d'un panénome particulièrement bien adapté à la production d'énergie électrique dans les conditions climatiques du Canada septentrional. Au cours de la procédure d'obtention du brevet, il est apparu que la même invention avait été brevetée en France par Georges Darrieus en 1927. L'invention n'avait toutefois jamais dépassé le stade d'une curiosité dans le domaine aérodynamique.

Les recherches sur l'éolienne à axe vertical de type Darrieus (EAV), en vue d'applications dans les pays en voie de développement et de petites sources d'alimentation pour des ensembles électroniques éloignés, se sont poursuivies en sourdine au CNRC jusqu'à l'embargo pétrolier décrété par les Arabes en 1973. Cet embargo a provoqué un engouement pour toutes les autres sources potentielles d'énergie ce qui a donné naissance à la structure fédérale actuelle de la recherche et développement énergétiques dont fait partie le programme de recherche et développement sur l'énergie éolienne, composante du Groupe d'étude sur la R et D des énergies renouvelables. Le programme de RDEE a été réorienté vers les technologies qui pourraient fournir des quantités d'énergie importantes dans le contexte canadien.

Au cours des six années qui ont suivies, les ressources du programme de RDEE ont augmentées par le biais du Comité interministériel sur la recherche et le développement énergétiques jusqu'au niveau actuel d'environ $1 million par an; le CNRC consacre maintenant le service de quatre chercheurs à cette activité. Parallèlement à l'augmentation de l'aide financière, le programme de RDEE, d'abord un programme interne du CNRC, a été remis en grande partie entre les mains de l'entreprise privée par la voie de contrats. Cette réorientation a grandement favorisé le transfert de technologies vers l'industrie canadienne.

3.2 Objectifs du programme de RDEE

Voici les principaux objectifs du programme de recherche et développement sur l'énergie éolienne (RDEE):

a) Déterminer dans quelle circonstance l'énergie éolienne peut constituer une source d'énergie rentable au Canada.

b) Établir la technologie des systèmes de conversion de l'énergie éolienne (SCEE) adaptée aux conditions canadiennes.

c) Encourager et aider les initiatives des industries canadiennes dans le domaine de la conception et de la fabrication des SCEE tant pour le marché intérieur qu'international.

3.3 Portée et orientation du programme de RDEE

Les trois paramètres qui définissent la portée du programme de RDEE sont:

- types d'éolienne
- formes de l'énergie utilisable
- échelle des systèmes

3.3.1 Types d'éolienne

Les éoliennes sont caractérisées par deux paramètres, soit:
- le principe aérodynamique de conversion énergétique;
- la configuration aéromécanique du matériel.

Il y a deux catégories pour chaque paramètre dont voici ci-dessous les principales caractéristiques.

Principes aérodynamiques

Machines à traînées (traditionelles) (qui exploitent la traînée différentielle pour produire un couple)

- autodémarrage aérodynamique
- grande solidité (nombreuses pales)
- faible vitesse et couple élevé
- faible rendement aérodynamique

Machines à poussées (modernes) (qui exploitent la portance aérodynamique pour produire un couple)

- démarrage assisté
- faible solidité (quelques pales)
- vitesse relativement élevée
- rendement aérodynamique élevé

Configurations aéromécaniques

Axe horizontal (EAH)

- dispositif d'orientation dans le vent
- tour élevée
- réglage éventuel du pas

Axe vertical (EAV)

- omnidirectionelle
- tour de faible hauteur
- machinerie au sol
- haubans

Avec le renouveau d'intérêt pour la conversion de l'énergie éolienne, les efforts globaux de R et D ont largement porté sur l'éolienne à axe horizontal (EAH). Cet accent reposait sur deux considérations. D'abord on ne connaissait pratiquement pas le principe de la poussée propre à l'éolienne à axe vertical - même M. Darrieus n'a pas poursuivi le développement de son intention pendant "l'ère du pétrole abondant" qui a suivi. Deuxièmement, on avait déjà acquis des connaissances poussées sur le fonctionnement des hélices d'aéronef et les rotors d'hélicoptère dont une grande partie est directement applicable au rotor des éoliennes à axe horizontal.

Toutefois, les efforts canadiens de R et D sur les SCEE avaient été concentrés sur les EAV, et les recherches de l'EAN ont mené à la découverte de plusieurs caractéristiques intéressantes de cette configuration en particulier pour la production d'électricité; L'EAV apparaissait généralement comme le moyen le plus prometteur d'intégrer l'énergie éolienne aux approvisionnements en énergie à l'échelle nationale. Des études préliminaires ont montré que la variante canadienne de l'EAV de type Darrieus présentait des avantages techniques et économiques par rapport aux EAH. C'est de là que découle la décision de poursuivre des recherches sur la configuration EAV, en se fondant sur le leadership canadien bien établi dans cette discipline.

3.3.2 Formes de l'énergie utilisable

Comme l'énergie mécanique de la plupart des SCEE se retrouve sur l'axe, l'étape finale du processus de conversion n'a, jusqu'à un certain point, pas de rapport direct avec la R et D des SCEE. Néanmoins, les caractéristiques de la forme utile de l'énergie ont un effet sur le rendement de l'éolienne. Aussi, dans le cas d'un programme limité de R et D, il est logique d'orienter le plus possible les travaux vers les premières applications prévues.

L'énergie éolienne est aléatoire et, par conséquent, nécessite une forme quelconque de stockage ou de liaison avec un système de transport de l'énergie qui puisse accepter l'apport aléatoire de l'éolienne. Cette dernière technique d'ajustement de l'offre de la demande, et l'existence de réseaux denses de distribution de l'électricité font que l'aéroélectricité est la forme logique d'intégration des apports sur une grande échelle de l'énergie éolienne aux grands réseaux d'approvisionnement énergétique. Par conséquent la priorité a été donnée aux applications visant l'approvisionnement des réseaux électriques.

Pour les SCEE éloignés, les problèmes et les coûts de stockage peuvent être moindres que les coûts de branchement aux réseaux existants. Actuellement, cela ne vaut que pour les systèmes isolés dont la puissance de sortie moyenne est très faible.

Dans certaines circonstances spéciales, il est préférable de disposer d'une source d'énergie non électrique, notamment pour pomper de l'eau d'irrigation dans les zones éloignées. Au Canada, il n'y a pas de forte demande dans ce sens, mais de tels systèmes figureront sans

doute au premier plan des exportations futures vers les pays en voie de développement. Actuellement, bien que le développement des SCEE soit encore essentiellement à l'étape de la technologie des rotors, les résultats ont un certain rapport avec la plupart des applications avec arbre de transmission.

3.3.3 Échelle des systèmes

La construction d'éoliennes appelle d'importants investissements financiers; les plus grands coûts d'exploitation des SCEE sont les intérêts payés sur l'investissement initial. Comme pour la plupart des dispositifs aérothermodynamiques, la puissance de sortie des éoliennes varie en fonction du carré des dimensions linéaires et la masse des matériaux en fonction du cube, si bien que le coût de l'unité de puissance de sortie tend à augmenter avec les dimensions. Toutefois pour les éoliennes de la gamme inférieure au mégawatt, d'autres facteurs compensent la relation "carré-cube" et font augmenter les coûts des systèmes plus petits. Par exemple, le coût relatif de fabrication, des génératrices, et des systèmes de commande est supérieur, et la puissance inférieure du fait que la vitesse des vents est plus faible au niveau du sol. La tendance actuelle est donc aux grosses éoliennes à axe vertical reliées aux réseaux d'électricité.

On reconnaît toutefois que de nombreuses applications potentielles existent là où des circonstances locales rendent plus séduisante l'énergie éolienne, même à un prix supérieur à celui de l'électricité du réseau national, par exemple dans les collectivités isolées et pour les systèmes électroniques à commande à distance. Par conséquent, les activités d'expérimentation du programme RDEE servent souvent deux fins simultanément: une EAV unique peut être à la fois un modèle réduit d'une unité de plusieurs mégawatts et un prototype en grandeur réelle, de la composante éolienne d'un réseau d'approvisionnement d'une communauté isolée.

En résumé, l'accent du programme canadien de RDEE est mis sur les grosses EAV et couplées à un réseau. Toutefois, on reconnaît que d'autres utilisations nécessitent des dimensions différentes ainsi que d'autres formes d'énergie de sortie; une grande partie de la technologie mise au point pourra être appliquée directement à ces cas plus particuliers.

3.4 Applications, apports et effets sur l'industrie

On peut grouper comme suit les applications des EAV:

Fin particulière (communications) (aides à la navigation)

- installations avec une éolienne de 1 kW (cc)
- distribution sur demande (stockage requis)
- fiabilité (dans les régions éloignées, pas de système d'appoint)
- prix élevé: $10000 par kilowatt installé

Collectivités éloignées (Canada septentrional) (régions isolées)

- installations avec une éolienne unimodulaires de 100 kW (ca)
- réseau local - pas de stockage
- couplée à un groupe électrogène (diesel)
- exploitation axée sur l'économie de combustible
- $1500 par kilowatt installé (15¢ par kilowattheure)

Réseau national (compagnies de service)

- installation multimodulaire de 10000 kW (ca)
- reliée au réseau - pas de stockage
- économie de combustible plus crédit de capacité
- $500 par kW installé (5¢ par kilowattheure)

Remarquer que des dimensions des installations diffèrent de deux ordres de grandeur d'une catégorie à l'autre. Seules les installations de l'ordre du mégawatt peuvent fournir un apport mesurable au réseau électrique provincial ou national. Toutefois, comme l'énergie éolienne et d'autres sources d'énergie ne sont pas réparties uniformément parmi les provinces du Canada, l'apport probable de l'aéroélectricité peut varier grandement d'une région à l'autre. Voici d'autres considérations qui modifieront les apports prévus de l'aéroélectricité au Canada:

1. Les éoliennes ne peuvent pas récupérer toute l'énergie du vent. Le maximum théorique est de 59,3% mais d'autres facteurs le réduisent à une valeur réalisable d'environ 40%.

2. La pénétration maximale prévue dans tout réseau provincial est d'environ 20%, et ce afin de maintenir les normes actuelles de stabilité sans stockage tampon.

3. Les éoliennes doivent être raisonnablement proches des principaux réseaux électriques pour minimiser les coûts de transport.

4. Les éoliennes ne peuvent toutefois pas être trop proches les unes des autres. Une hypothèse prudente est que la zone balayée par le rotor devrait être inférieur à 1/1000 de la surface au sol allouée à l'éolienne.

5. L'énergie éolienne doit être rentable. Au début elle sera donc utilisée seulement dans les régions les plus venteuses, mais son utilisation s'étendra au fur et à mesure que le coût des combustibles fossiles augmentera, et ce jusqu'à un niveau de pénétration qui dépendra de la région et du type de centrale en exploitation dans la région (par exemple jusqu'à 20% dans l'Île du Prince-Édouard, mais probablement pas plus de 2% en Ontario).

6. La construction des centrales de conversion de l'énergie éolienne prend beaucoup de temps.

De ces considérations découle le tableau suivant des évaluations préliminaires de l'apport de l'énergie éolienne au Canada et du potentiel commercial des SCEE à EAV.

Ces projections sous-entendent qu'il faut commander le premier prototype canadien de l'ordre du mégawatt en 1984, en vue de son entrée en production en 1988, et construire environ 200 éoliennes de l'ordre du mégawatt par an à partir de 1992.

On prévoit aussi des marchés extérieurs importants en particulier dans les pays en voie de développement, dont la plupart sont situés dans la zone des alizés. Les exportations canadiennes pourraient aller de la technologie d'évaluation des ressources en passant par la conception et la fabrication de composantes jusqu'à la vente clé en main de centrales éoliennes EAV. On prévoit qu'au début les deux premières catégories de systèmes conviendront à ces marchés étrangers; par conséquent, ces derniers sont des débouchés logiques pour des applications domestiques destinées aux télécommunications et aux collectivités isolées du nord canadien.

Tableau II: Marché potentiel pour les grands SCEE

Année	Apport en électricité PJ/an*	MW moyen	Valeur cumulée MW Inst.	Valeur cumulée Nombre SCEE 3,2 MW	Investissement $ Millions (1980)
1990	2	64	320	100	150
2000	20	640	3200	1000	1000
2020	100	3200	16000	5000	5000

*Si cette énergie électrique était produite dans une centrale thermique, il faudrait environ trois fois plus de pétrole, de gaz ou de charbon pour produire l'énergie équivalente.

3.5 Structure du programme de RDEE

Les objectifs importants du programme de RDEE seront atteints au moyen des trois types d'activités interdépendants suivants:

Évaluation des ressources et du meilleur site d'implantation - quantification de la nature et de la répartition des ressources éoliennes, compilation de données météorologiques nécessaires à l'évaluation des applications potentielles de l'énergie du vent et à la conception des SCEE. Ces travaux sont principalement effectués par le Service de l'environnement atmosphérique (SEA) du ministère de l'Environnement, et complétés par le programme d'étude du potentiel éolien du CNRC. Les activités comprennent:

- coordination des données existantes
- techniques analytiques et expérimentales de modélisation
- étalonnage et déploiement des instruments de mesure du vent
- évaluation des sites d'implantation et du potentiel éolien

Recherche et développement de la technologie - définition des caractéristiques fondamentales des SCEE: rendement, structure, principe et incidence sur l'environnement. Avant 1974, ces activités étaient entièrement du ressort du LABV de l'EAN. Depuis lors, une partie importante de ces activités de recherche fondamentale a été confiée par le biais de contrats aux industries canadiennes qui se servent de l'expérience interne du CNRC comme point de départ. Voici des exemples d'activités:

- aérodynamique analytique et expérimentale des surfaces portantes et des rotors
- modélisation et essai aéroélastiques
- développement de méthodes de conception de la dynamique des structures
- rendement des systèmes et prévisions économiques
- étude de systèmes de collecte des énergies nouvelles
- étalonnage en soufflerie de petites éoliennes commerciales
- développement d'installations de recherche sur les éoliennes

Essais pratique et aides techniques à l'industrie - incorporation de la technologie canadienne des SCEE dans les installations d'essai sur le terrain, conçus et fabriqués par des entreprises canadiennes, et essayés en collaboration avec les utilisateurs potentiels. Ce type d'activité est le plus visible du programme RDEE et constitue une nouveauté par rapport au développement habituel en laboratoire des nouveaux systèmes industriels. Actuellement, il y a environ 12 systèmes expérimentaux au Canada, allant de système de moins de 1 kW à des installations d'environ ¼ MW de puissance utile nominale. Un centre national a été créé, l'Atlantic Wind Test Site, dans le but de fournir du personnel expérimenté et du matériel adéquat pour les essais des SCEE construits au Canada et à l'étranger.

Le CNRC a accordé à l'industrie d'importants contrats d'analyse des paramètres techniques et économiques de grosses EAV destinées à être reliées aux grands réseaux d'électricité. Une étude importante des paramètres, terminée en 1978, chiffrait la sensibilité économique et technique de 12 paramètres théoriques clés des EAV. En premier lieu venaient les dimensions; les résultats ont montré la faisabilité technique et les avantages économiques des systèmes de l'ordre du mégawatt. C'est à partir de cette étude qu'est née l'idée de construire un prototype de puissance nominale maximale d'environ 3 MW: le projet ÉOLE. Pour justifier en partie le projet, les agences initiatrices (Hydro-Québec et CNRC) ont commandé une étude comparative exhaustive des aspects techniques et économiques des EAH et des EAV, étude basée sur les plus récentes données de rendement et de coût des EAH américaines. Voici les conclusions de cette étude poussée, extraites du rapport final de l'entrepreneur.

Après l'étude de conception et l'analyse de rentabilité des EAH et des EAV examinées dans les phase III voici les conclusions du présent rapport:

a) Les EAV sont économiquement supérieures sur la base des coûts comparés de l'énergie.

b) Les EAV ont l'avantage technique d'une conception fondamentalement plus simple. En particulier, le fait que le système d'entraînement soit au sol réduit au minimum les contraintes de configuration, les dimensions physiques du matériel et les spécifications de l'équipement, ce qui élargit la perspective d'une production énergétique accrue et d'une réduction du coût de l'énergie.

c) Les configurations de pointe pour les EAH et les EAV... indiquent que les EAV resteront compétitives par rapport aux EAH. Pour les EAV, l'utilisation d'un système de transmission sans engrenages et l'amélioration du rendement du rotor réduiraient les coûts de l'énergie par un taux accru de récupération de l'énergie et un coût d'immobilisation réduit.

3.6 Communication des résultats du programme de RDEE

Les résultats des activités du programme de RDEE sont diffusés de plusieurs façons. Les découvertes scientifiques font l'objet d'articles dans des revues spécialisées ou de communications lors de conférences ainsi que de rapports du CNRC. L'annexe A donne une liste d'un certain nombre de telles publications. Récemment, L'EAN a lancé une série de publications moins formelles afin de véhiculer rapidement les analyses et essais à court terme. Les quelques premiers articles de cette série Note technique sur l'énergie éolienne se trouvent aussi dans la liste de l'annexe A. Des copies des rapports finals des études commandées à forfait et qui sont sans classification sont disponibles à l'Institut canadien de l'information scientifique et technique (ICIST) et figurent, ainsi que les rapports internes du CNRC, dans la plupart des fichiers des bibliothèques.

Les communications personnelles entre les diverses industries et agences gouvernementales participant au programme de RDEE font l'objet de rapports réguliers et de réunions d'étude sur l'avancement des travaux. Tous les projets d'essais expérimentaux font l'objet de telles réunions à intervalles réguliers d'un mois à un trimestre. Les données sur l'avancement de la plupart des projets sont analysées sous contrat, et des états mensuels quantitatifs seront publiés à compter de l'automne 1981 lorsque les programmes informatiques seront terminés et vérifiés.

Un colloque spécial sur l'évaluation des ressources éoliennes a été tenu au CNRC en octobre 1980. Y ont participé des chercheurs, des concepteurs, des ingénieurs-conseils, des fabricants, des utilisateurs de SCEE ainsi que des scientifiques du SEA et du CNRC responsables des mesures et de la compilation des données. Le compte rendu du colloque a été publié sous le numéro TM-WE-003 (référence 20).

La connaissance de ce qui se passe dans le monde de l'énergie éolienne s'acquiert par la lecture des journaux scientifiques, par la participation aux grandes conférences et par la participation aux projets internationaux parrainés par l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Par la voie du CNRC et du SEA, le Canada participe à

la préparation de deux annexes de l'Accord de l'AIE pour la mise en oeuvre d'un programme de R et D des SCEE, et envisage d'en faire autant pour deux nouvelles annexes. L'approbation du projet ÉOLE a permis au Canada de devenir membre de l'Accord de l'AIE concernant les grands SCEE, sur l'invitation des participants actuels.

4.0 ÉTAT DES PROJETS EN COURS

4.1 Évaluation des ressources et des sites d'implantation

Pour faire des prévisions du rendement et, donc, évaluer la puissance de sortie prévue d'un système de conversion de l'énergie éolienne à un endroit donné, il faut connaître les données météorologiques suivantes:

- vitesse moyenne annuelle des vents à long terme
- distribution des vitesses horaires des vents
- variation de la vitesse des vents avec l'altitude
- distribution en fonction de la direction
- statistiques sur la constance des accalmies
- variations saisonnières et diurnes
- coup de vent, turbulence, cisaillement, vents extrêmes et autres extrêmes climatiques
- prévisions à court terme

Il est nécessaire d'avoir des données concernant le vent sur plusieurs échelles pour mettre au point et évaluer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Voici les différentes échelles:

GRANDE ÉCHELLE — Domaine 1000 à 10000 km
Résolution ~100 km
- cartes du potentiel énergétique à grande échelle (nationale)
- identification des grandes régions de moyenne échelle à fort potentiel

MOYENNE ÉCHELLE — Domaine ~100 - 500 km
Résolution ~ 5 - 10 km
- localisation des régions à forte densité énergétique entre les isotaches de cartes d'énergie de grande échelle
- modèles numériques d'échelle moyenne
- techniques de corrélation entre les stations

ÉCHELLE LOCALE — Domaine ~1 - 10 km
Résolution ~10 - 100 m
- effets de la topographie locale - collines, crêtes montagneuses, escarpements, barrières, etc.
- modèles analytiques et numériques de l'écoulement -au-dessus de ces accidents de terrain
- maquettes (p. ex. de soufflerie - échelle 1:5000)

MICROÉCHELLE — Domaine ~100 m
Résolution ~0,01 - 0,1 m
- charge de rafales, effets de turbulence
- effets de cisaillement
- contraintes sur les structures

Le Service de l'environnement atmosphérique (SEA) du ministère de l'Environnement est le principal responsable de cette partie

du programme de RDEE. Le mandat général consiste à saisir et traiter ces données climatologiques, et de les diffuser dans l'ensemble du Canada. Le SEA exploite plus de 300 stations météorologiques où des données sont recueuillies depuis de nombreuses années. Ces stations répondent à des demandes générales de renseignements climatologiques, ce qui explique pourquoi elles sont souvent situées aux aéroports ou près des centres urbains. Comme il n'y a que quelques stations dans les régions venteuses, les prévisions sur l'énergie éolienne, fondées sur les données de ces stations, tendent à être prudentes. Le personnel du SEA se compose de météorologues et d'aérodynamitiens de l'atmosphère qui font des recherches sur une vaste gamme de phénomènes connexes au climat. Les activités du SEA en matière d'énergie éolienne sont regroupées en deux domaines généraux:

a) Développement de statistiques sur le potentiel éolien
b) Évaluation de sites d'implantation pour les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

On esquisse dans les paragraphes suivants les projets du SEA et le prolongement de certains aspects de ces travaux faits par le CNRC.

4.1.1 Normalisation et mise en forme des données existantes

Toutes les stations de mesure de SEA enregistrent chaque heure la vitesse et la direction moyennes sur une période d'une minute. Pour bon nombre de ces stations, ces données ont été accumulées au cours de plusieurs décennies; toutefois la hauteur des anémomètres varie d'une station à l'autre. Afin de fournir des données comparables du potentiel éolien au Canada, ces données d'archives ont été normalisées pour une hauteur de 10 m. L'utilisateur s'est vu faciliter l'accès à ces données grâce à leur remise en forme qui permet l'emploi de programmes FORTRAN, ainsi qu'à l'insertion (et au repérage) des données interpolées qui comblent au besoin les lacunes.

4.1.2 Carte nationale de l'énergie éolienne

Les renseignements provenant de 150 stations du SEA, accumulés pendant plus de 10 années, servent à calculer et tracer des courbes d'isodensité de l'énergie éolienne au Canada. Les cartes antérieures de Templin du CNRC (circa 1975) ne donnaient pas les lignes d'égale énergie éolienne en Colombie-Britannique à cause de l'irrégularité du terrain qui occasionnait des variations excessives des données (figure 3). Sur de telles cartes, l'énergie éolienne est calculée à partir des vitesses annuelles moyennes du vent, dont on suppose que la variation dans le temps suit une distribution de Rayleigh (réf. 4.1.3), d'après l'équation:

$$E/A = (6/\pi)(\tfrac{1}{2})\rho\ \overline{V}^3$$

où
E/A = densité d'énergie éolienne (W/m^2)
ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3)
$\overline{V}$ = vitesse moyenne du vent (m/s)
$6/\pi$ = coefficient découlant d'une distribution de Rayleigh de la vitesse du vent dans le temps

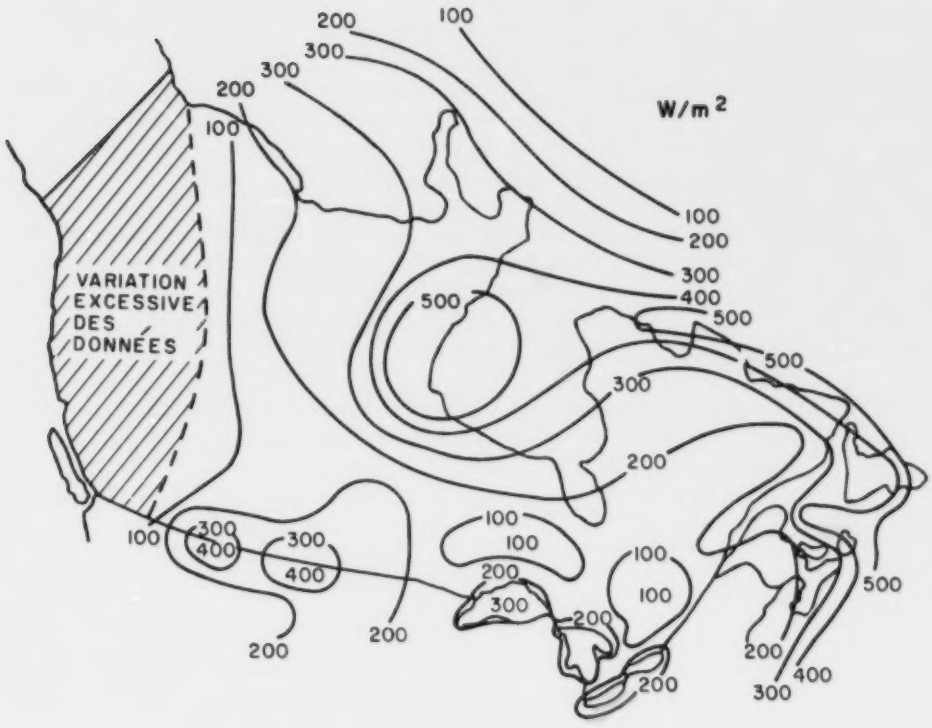


Figure 3. Densité de l'énergie éolienne annuelle moyenne è 30 m d'altitude

Les bureaux régionaux du SEA fournissent des renseignements provenant de stations locales non rattachées au SEA, afin d'aider à combler cette lacune. La publication de nouvelles cartes sur l'énergie éolienne est prévue pour la fin de 1981.

D'autres cartes à l'étude illustreront (de façon grossière) les classes de stabilité atmosphérique, une échelle nationale de "relief" et les variations mensuelles et saisonnières.

4.1.3 Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude et du temps

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne fonctionnent dans la couche limite atmosphérique où la vitesse du vent varie avec l'altitude (figure 4a). La relation établie entre la vitesse et l'altitude est une fonction puissance d'exposant α qui varie selon la topographie et la stabilité atmosphérique, notamment la vitesse du vent. On poursuit des recherches expérimentales à partir d'une tour de 250 m érigée à Starbuck (Manitoba) pour vérifier cette relation. Le paysage environnant est celui des Prairies, composé de fermes, de buissons bas et de terres arables. On mesure à intervalle d'une minute la température pour 10 niveaux, ainsi que la vitesse du vent et sa

direction pour sept niveaux à des intervalles d'une minute. Une autre tour de 40 m a été érigée à 100 m de la précédente dans le même but. Ces mesures sont comparées aux résultats des essais de modèles analytiques. Les analyses statistiques comprennent des études de séries temporelles, d'études de la fréquence de diverses classes de vitesses du vent et des analyses des valeurs extrêmes qui persistent un certain temps au-dessus et au-dessous des vitesses seuils.

La relation de la vitesse du vent en fonction du temps est habituellement exprimée sous la forme d'une courbe de probabilité (illustrée à la figure 4b) caractérisée par le coefficient de Weibull. On se sert souvent d'une distribution particulière pour prévoir le potentiel éolien, celle de Rayleigh (coefficient de Weibull = 2,0).

Pour savoir à quel point les coefficients de Weibull et de Rayleigh sont réalistes, on applique les distributions à différents sites.

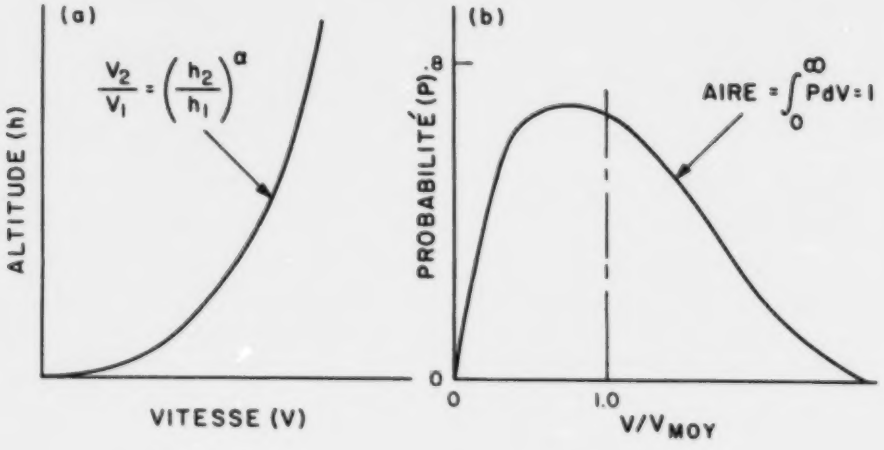


Figure 4. Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude et du temps

4.1.4 Effet des caractéristiques locales du terrain

On a revu la documentation et effectué quelques essais préliminaires en soufflerie pour évaluer l'état des connaissances sur la prévision de l'effet des collines et des escarpements sur les paramètres d'écoulement du vent. Voici les principales conclusions:

- un modèle simplifié des perturbations potentielles devrait permettre de prévoir l'accélération avec une précision comparable à celle d'autres modèles

- une crête triangulaire approche le mieux la réalité du point de vue de l'accélération

- les essais en soufflerie qui appellent de la circonspection comportent plusieurs faiblesses et limitations, p. ex.

    - effets de blocage
    - rugosité variable
    - interférence due aux sondes et aux supports

- manque flagrant de bonnes expériences en grandeur réelle pour déterminer les écarts entre les diverses méthodes, pour les systèmes bi et tridimensionnels.

Afin d'étudier ces questions, on a entrepris une étude comparative en trois volets portant sur des données d'expériences en grandeur réelle, d'essais en soufflerie et d'analyses pour un site d'implantation "idéal". Les mesures en grandeur réelle sont effectuées sur un site propre "idéal" dans le sud-ouest de l'Alberta. Les observations préliminaires de février 1980 ont mis en évidence un facteur d'accélération important (50%). Des observations plus poussées sont prévues pour 1981. Les essais sur maquette sont effectués dans la soufflerie à couche limite (1,82 m × 2,44 m). Au début, on a utilisé une maquette à l'échelle de 1:1000, mais les prochains projets comprendront des recherches sur l'exagération des dimensions verticales. Le modèle analytique a été mis au point l'année passée et incorpore des équations d'écoulement simplifiées, des perturbations linéarisées, des régions internes et externes, et une transformée de Fourier bidimensionnelle du terrain.

Ces travaux sont liés étroitement à une expérience internationale sur l'écoulement au-dessus d'une colline idéale que le Canada, la Norvège, l'Allemagne, l'Angleterre et le Danemark effectueront au cours des trois prochaines années, probablement dans le cadre du programme de l'Agence internationale de l'énergie sur la R et D des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Voici les sites potentiels:

- Askervein (North Uist, Outer Hebrides)
- Blashaval (South Uist)
- Kettles' Hill (Pincher Creek, Alberta)

On prévoit être fixé sur la sélection des sites et l'approbation de leur utilisation en mai 1981, car des expériences préliminaires seront prévues pour l'été 1981 et les principales observations seront faites au cours des deux années suivantes. Le rapport final devrait être publié en 1984.

4.1.5 Modèle des petites zones pour l'évaluation des sites d'implantation

Un modèle numérique des petites zones (SAM) est actuellement en cours d'évaluation comme outil d'identification des sites venteux parmi les stations de mesure existantes. On a essayé le modèle dans le sud-ouest de l'Alberta en utilisant des données sur le vent provenant d'une station du SEA (Lethbridge), en vue d'obtenir des prévisions pour trois autres stations du SEA éloignées d'environ 200 km dans différentes directions et de topographies diverses. Les premiers résultats sont prometteurs.

Le même modèle (SAM) est appliqué à des données d'Oahu (Hawaii) et aussi de Gotland (Suède); il s'agit là de l'apport du Canada au programme de l'Agence internationale de l'énergie sur l'évaluation de modèles de sélection des sites d'implantation des éoliennes (R et D sur les SCEE, annexe 1).

4.1.6 Prévisions sur le vent à long terme par des méthodes statistiques

Des prévisions à long terme pour un site, fondées sur des mesures à court terme, sont en préparation; des corrélations avec des données à long terme provenant d'un autre site situé à 100 km de là le sont aussi. Diverses approches ont été évaluées à partir de deux couples de stations du SEA situées en Ontario et en Alberta. Jusqu'à maintenant, les résultats n'ont pas été très heureux, et on songe à annuler le projet.

4.1.7 Décroissance du sillage des éoliennes

Au cours de la dernière année, on a mis au point un programme informatique fondé sur le modèle numérique bidimensionnel de la couche limite atmosphérique stratifiée neutre, incorporant des perturbations linéarisées, avec intégration par ligne. Le modèle a été appliqué au cas idéal de Kakuku Hills, mais n'a pas été amélioré.

4.1.8 Mesures de la structure des vents au-dessus des terrains ruraux

Des mesures en grandeur réelle de la structure des vents et de la turbulence dans la couche limite atmosphérique sont prises par des anémomètres à trois composantes montés dans un plan horizontal sur des tours de 10 m de haut (plus un tour de référence de 50 m pour mesurer le cisaillement du vent) sur un site agricole de l'Ontario.

4.1.9 Projet de prospection éolienne du CNRC

Dans le cadre d'arrangements à frais partagés avec les principaux utilisateurs potentiels de l'énergie éolienne, le CNRC met à leur disposition des systèmes intégrés d'enregistrement d'histogrammes éoliens pour la survie des conditions réelles du vent sur les sites retenus. L'appareillage comprend un anémomètre de grande précision monté sur une tour de 20 m, ainsi qu'un enregistreur à canaux alimenté par des accumulateurs solaires. Il ne mesure que la fréquence des vitesses du vent, à intervalles de 2 s, fréquence notée par un coup dans le canal approprié. Il y a 64 canaux, chacun d'une largeur de 0,5 m/s, sauf le dernier qui accumule la fréquence de toutes les valeurs supérieures à 32 m/s. Le matériel est donc conçu pour établir la distribution des fréquences des vitesses des vents, quelle que soit la période considérée (par exemple, un jour, une semaine, un mois, etc.). Les données stockées dans les canaux sont lues et enregistrées manuellement par un agent qui visite le site régulièrement. Le traitement et la présentation des données sont effectués par une étude d'ingénieurs dans le cadre d'un contrat avec le CNRC.

Il y a actuellement 13 systèmes d'enregistrement d'histogrammes éoliens actuellement déployés au Canada, et d'autres suivront.

4.1.10 Techniques de cartographie de l'énergie éolienne

Les figures 3 et 5 montrent deux façons différentes de cartographier l'énergie éolienne au Canada. Toutes deux ont été mises au point au CNRC dans le laboratoire d'Aérodynamique des basses vitesses, la première (figure 3) il y a plusieurs années et la second en 1979. Les deux cartes sont dérivées de méthodes différentes qui ont permis une meilleure relocalisation des isolignes aux différentes altitudes.

La figure 3 a été obtenue comme suit. Tous les emplacements des anémomètres du SEA ont été pointés sur une carte du Canada. Les vitesses moyennes du vent à chaque site ont alors été extrapolées pour une altitude de 30 m (la plupart des anémomètres était situés à une même altitude de 10 m) au moyen d'une fonction puissance. On a supposé que les sites de conversion de l'énergie éolienne pourraient être situés en terrain relativement dégagé et que l'exposant de la fonction valait partout 0,16. Les vitesses moyennes extrapolées ont alors été converties en densités d'énergie moyennes et notées sur la carte; puis on a tracé les courbes d'égale densité d'énergie en reliant les points d'égale densité d'énergie éolienne.

La figure 5 a été établie à l'aide de statistiques sur les vents, à une altitude de 500 m, tirées de mesures de radiosondes. Les données ont été transformées en vitesses moyennes annuelles à 500 m, puis notées sur une carte du Canada. En comparant les viteses à 500 m d'altitude avec celles à la surface des sites et en supposant qu'elles obéissent à une fonction puissance de l'altitude, on a tracé une carte d'égal exposant effectif de la fonction puissance. Comme on pouvait s'y attendre, les faibles valeurs de l'exposant (dans la gamme de 0,15 à 0,2) se retrouvent dans les grandes régions plates et dégagées telles que les Prairies méridionales, le Golfe du Saint-Laurent et la toundra septentrionale, tandis que les valeurs élevées (de 0,25 à 0,35) se retrouvent dans le grand U aplati de forêt boréale qui traverse le Canada. Les courbes d'égal exposant de la fonction puissance ont alors été utilisées pour calculer, à partir des vents à 500 m, les vitesses moyennes à 50 m. Ces dernières ont ensuite été converties en densités énergétiques de la même manière qu'à la figure 3.

4.1.11 Sélection du site pour ÉOLE

Six sites sont actuellement à l'étude en vue de l'implantation d'un prototype d'EAV de l'ordre du mégawatt: le projet ÉOLE. Cinq des sites se trouvent dans la vallée du Saint-Laurent, l'autre dans les Iles de la Madeleine près de l'éolienne expérimentale actuelle de 230 kW (voir alinéa 9.3.4) où le régime des vents a été bien étudié. Le SEA installera sur les trois meilleurs sites de la vallée du Saint-Laurent des instruments qui permettront de monitorer pendant un an les paramètres suivants:

- vitesse du vent à 10, 20, 40 et 60 m
- direction du vent à 10 et 60 m
- température à 10 et 60 m

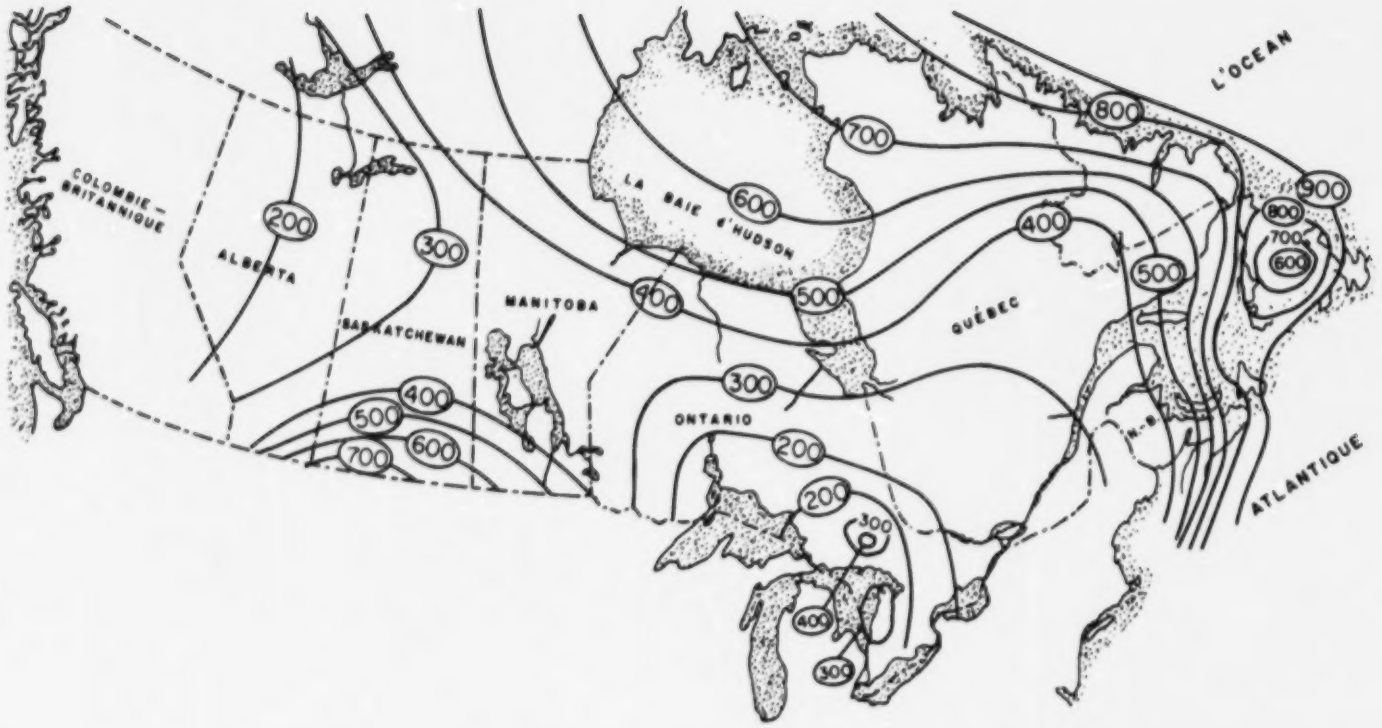


Figure 5. Densité de l'énergie éolienne annuelle moyenne à 50 m d'altitude (W/m^2)

4.1.12 Programme de prévision de la production énergétique

Un programme simple de calcul a été mis au point pour fournir des prévisions grossières de la production probable d'énergie pour un site donné. Il utilise des données généralisées de rendement éolien et suppose que les vitesses du vent se répartissent suivant la distribution de Rayleigh par rapport à la moyenne annuelle connue pour le site.

4.2 Recherche et développement de la technologie

La recherche fondamentale a conduit à la réinvention de l'éolienne à axe vertical de type Darrieus au laboratoire d'Aérodynamique des basses vitesses du CNRC par Raj Rangi et Peter South sous la direction de Jack Templin. L'intérêt accru pour l'énergie éolienne, suite à l'embargo pétrolier de 1973-1974, a accéléré la conduite d'essais sur le terrain en collaboration avec des organismes susceptibles de devenir des utilisateurs. En conséquence, le personnel du CNRC s'est de plus en plus occupé du dépannage et de la supervision des programmes d'essais sur le terrain et, conformément à la politique du gouvernement fédéral, a confié à forfait une plus grande partie des travaux de recherche à l'industrie privée.

4.2.1 Calcul du rendement et des charges aérodynamiques

On peut prévoir les performances approximatives des EAV en considérant la zone balayée par le rotor comme un tube de courant unique que traversent les pales une fois par tour du rotor (référence 4). Des prévisions plus précises peuvent être obtenues en divisant la zone balayée par le rotor en tranches horizontales, en analysant l'aérodynamiques des pales dans chaque tranche, puis en intégrant les résultats pour obtenir la performance globale du rotor. La version du CNRC de cette dernière technique a été nommée la méthode du tube de courant à sections multiples (Multiple Stream Tube) et a été utilisée par les fabricants lors de la conception des premiers systèmes canadiens.

Plus récemment, d'autres raffinements ont été apportés pour tenir compte de la perte de vitesse due à l'extraction d'énergie par la(les) pale(s) avant lors du calcul des forces s'exerçant sur la(les) pale(s) arrière(s). Cette technique améliorée a été nommée la méthode du double tube de courant à sections multiples (Double Multiple Stream Tube). Elle a été programmée pour être utilisée avec un ordinateur de bureau muni d'une table traçante et fera l'objet d'une note technique sur l'énergie éolienne que le CNRC publiera prochainement.

Toutes ces techniques permettent de calculer différentes positions du rotor pendant qu'il effectue un tour complet. Ainsi, les variations substantielles du couple aérodynamique au cours de chaque rotation sont définies très précisément. En outre, comme la prévision de la performance globale du rotor nécessite le calcul des forces aérodynamiques, les charges aérodynamiques imposées à la structure du rotor sont aussi définies avec précision à l'aide de ces programmes.

4.2.2 Caractéristiques du profil aérodynamique

Les caractéristiques du profil aérodynamique des pales sont des données nécessaires pour tout calcul du rendement des EAV et des charges. La plupart des profils utilisés jusqu'à maintenant ont été des profils non cambrés normalisés tel que le NACA 0018. Toutefois, la plage des angles d'attaque des EAV existantes est bien supérieure à celle des aéronefs. En outre, pour les éoliennes de type Darrieus, on s'intéresse fort aux caractéristiques aérodynamiques aux angles supérieurs à l'angle critique d'attaque, puisque c'est dans cette région de fonctionnement que les EAV adaptent un comportement autonome lorsque la vitesse du vent est élevée. Par conséquent, il a fallu procéder à des étalonnages poussés en soufflerie du profil NACA 0018 du prototype des Iles de la Madeleine. Les essais ont été effectués sur une section de 24 po de corde de la pale originale de l'EAV de 230 kW dans la soufflerie de 6 pi × 9 pi du CNRC au laboratoire d'Aérodynamique des basses vitesses; on a établi l'équilibre des forces et la distribution de pression pour des angles d'attaque variant jusqu'à 180° par pas de 10°.

Une autre caractéristique des EAV existantes est le rapide changement cyclique de l'angle d'attaque. On pense que les caractéristiques dynamiques des profils peuvent être différentes de celles en régime permanent déterminées au cours des étalonnages décrits ci-dessus. Pour répondre à cette question, les étalonnages ont été répétés avec des profils oscillant à la fréquence et avec une forme d'ondes représentatives de celles observées sur l'EAV des Iles de la Madeleine. Les performances prévues à partir de données statiques et dynamiques sur les profils seront comparées aux résultats expérimentaux.

4.2.3 Analyse dynamiques des structures

Le rotor Darrieus est une structure tournante aéro-élastique complexe, soumise à une variété d'efforts dynamiques et périodiques. Ces nombreux modes vibrationnels et fréquences de résonnance doivent être déterminés et contrôlés pour éviter des contraintes ou une fatigue excessives. Les premières analyses en soufflerie de maquettes aéro-élastiques ont permis de définir les critères de résistance à la déformation des sections de pales pour éviter le flottement. Des analyses plus poussées effectuées au laboratoire des structures et matériaux des aéronefs du CNRC ont permis de prévoir les modes vibrationnels et les fréquences de résonnance. Ces prévisions seront comparées aux résultats expérimentaux obtenus aux Iles de la Madeleine.

En plus de la dynamiques de la structure de rotor lui-même, il faut aussi tenir compte des fréquences de résonance des haubans qui peuvent interférer avec les modes du rotor. L'analyse du système combiné rotor-haubans est compliquée par le fait que l'un est un système en rotation alors que l'autre est fixe.

Des travaux dans ce domaine très important sont en cours à l'IREQ, à Canadair, à DAF Indal ainsi qu'au CNRC. En outre, on établi des relations professionnelles avec les laboratoires Sandia National aux États-Unis qui font l'analyse du comportement dynamique des

structures du système combiné rotor-haubans des éoliennes de type Darrieus en utilisant une variante du programme NASTRAN.

4.2.4 Analyse des EAV

Une EAV classique comprend un rotor, un mécanisme de transmission, un alternateur, des commandes et une structure portante. Le mécanisme de transmission et l'alternateur doivent être conçus pour admettre la puissance maximale produite par le rotor. Toutefois, les distributions normales de vitesse du vent sont telles que la plus grande partie de l'énergie produite par les EAV l'est à des puissances très inférieures à la puissance maximale nominale. Par conséquent, les pertes fixes sont très coûteuses en termes de production énergétique, et il faut prendre bien soin de maximiser le rendement du mecanisme de transmission, en particulier aux faibles vitesses.

Il est connu que, même pour les systèmes EAV de l'ordre du mégawatt, il n'est pas économique de réaliser le rotor en fonction du régime venteux prévu. L'"optimisation" à un site particulier consiste à régler avec précision le système: la vitesse de fonctionnement, la puissance installée et les commandes. Par conséquent, il est important de savoir comment varie la puissance de sortie globale en fonction de chacun de ces paramètres. Par exemple, l'augmentation des dimensions de la génératrice pour un rotor et un régime venteux donnés augmente la puissance de sortie jusqu'à un certain point, pour ensuite la faire fléchir légèrement. En outre, l'augmentation des dimensions de la génératrice entraîne une diminution du rapport de la puissance moyenne à la puissance de sortie nominale et du temps de production, entraînant de fortes puissances pendant de courtes périodes pour une production globale identique. Ces constations peuvent être utiles pour de nombreuses applications futures. On a conçu un programme simplifié pour examiner ces diverses possibilités, et on en parle à l'alinéa 4.1.12.

Des études paramétriques poussées de grosses EAV reliées à des réseaux d'électricité ont été entreprises par la société d'Ingénierie Shawinigan Limitée dans le cadre d'un contrat avec le CNRC et l'IREQ. Ces études visaient à examiner les aspects de la conception et le coût de 72 systèmes dont les paramètres se situent dans les fourchettes ci- dessous:

Surface balayée (A):	1000 à 8000 m
Rapport de la hauteur du rotor à son diamètre (H/D):	1,0 à 2,0
Rapport de la corde des pales au rayon du rotor (Nc/R):	0,05 à 1,0
Nombre de pales (N):	1, 2, et 3
Rapport de la hauteur équatoriale à la hauteur du rotor (He/H):	0,5 à 1,0
Rapport de la puissance installée à la puissance éolienne:	0,5 à 2,0

On a fixé le régime venteux, supposé trois conditions générales des sols pour l'ancrage, choisi un site particulier (à Terre-Neuve) pour établir des coûts de transport et de construction et défini un scénario

de production de 200 unités pendant 10 ans. Le rapport de l'étude de conception de la Société d'Ingénierie Shawinigan (référence 10), publié en septembre 1978, conclut que, même pour les cas défavorables considérés (avec un scénario de production limitée), l'énergie électrique produite par des EAV de l'ordre du mégawatt couplées au réseau coûterait de 3 à 4 ¢ le kWh. Le rapport recommande aussi la construction et l'essai d'un prototype d'EAV de l'ordre du mégawatt pour confirmer sa faisabilité technique et examiner les caractéristiques opérationnelles et économiques d'une telle installation couplée au réseau électrique.

Une étude importante a été entreprise par l'IREQ en 1979 afin de comparer les EAV de l'ordre du mégawatt aux aérogénérateurs à axe horizontal classiques. Le CNRC et EMR ont par la suite accepté de parrainer et de diriger l'étude qui aborde la technologie des éoliennes du point de vue des compagnies d'électricité en mettant l'accent sur les mérites techniques et économiques relatifs des EAH actuelles et des EAV projetées. L'étude a été effectuée par la Shawinigan, avec l'aide de Canadair et de l'IREQ. Elle est fondée sur bien des informations utiles sur les grands aérogénérateurs en exploitation aux États-Unis. Les résultats de cette étude poussée ont été consignés dans trois volumes présentés par la Shawinigan en 1979 et 1980.

Le premier volume (référence 15a) revoit le sujet des aérogénérateurs dans son ensemble. Le second (référence 15b) est une comparaison technique des concepts des EAH et des EAV. Le troisième (référence 15c) compare deux EAH à leurs équivalents projetés EAV, en termes de prix de revient et de rentabilité. La principale conclusion de cette étude est que, pour un même niveau de développement, les EAV sont techniquement supérieures et légèrement plus rentables que les EAH. Les points saillants ainsi que les principales conclusions et recommandations de ces trois volumes ont été condensés dans un Résumé pour la Direction (référence 25d).

Une étude complémentaire, entreprise par la Shawinigan (et l'IREQ) pour le compte de l'Association canadienne de l'électricité (ACE), analyse les aspects techniques des mécanismes de transmission des aérogénérateurs et l'effet de diverses configurations sur la qualité de l'énergie (référence 16). Une autre étude, effectuée par la Montreal Engineering, traite de l'intégration des aérogénérateurs au réseau hydro-électrique et, en particulier, les avantages potentiels du stockage hydraulique dans un tel système.

Une étude récente de Whiteley (référence 21) a essayé d'évaluer les qualités relatives d'un alternateur à transmission directe muni d'un convertisseur de fréquence fixe et d'une boîte de vitesse plus classique suivie d'un alternateur à vitesse normalisée, pour un large éventail de puissances des aérogénérateurs.

4.2.5 Essais en soufflerie

Le CNRC exploite quatre souffleries qui conviennent à l'étude des éoliennes.

a) "Soufflerie de 3 pi"

- volume de travail 3 pi × 3 pi × 7.5 pi de longueur
- système d'équilibre partiel
- enregistreur de données portatif
- utilisée principalement pour l'étalonnage des anémomètres et la dynamique des rotors en drapeau
- vitesse maximale 150 pi/s

b) "Soufflerie de 6 × 9 pi"

- volume de travail 6,3 pi × 9,0 pi × 14 pi de longueur
- système d'équilibre dans six directions
- enregistrement automatique des données
- vitesse maximale 300 pi/s

c) "Soufflerie de 15 pi"

- section maximale de travail de 15 pi de diamètre
- écoulement vertical (ascendant)
- système d'équilibre des forces portatif
- système d'enregistrement semi-automatique des données
- vitesse maximale 70 pi/s dans la section de 15 pi de diamètre

d) "Soufflerie de 30 pi"

- volume de travail 30 pi × 30 pi × 75 pi de longueur
- système d'équilibre dans six directions
- enregistrement et rédaction automatique des données
- vitesse maximale 180 pi/s

Au cours des dernières années, plusieurs maquettes aérodynamiques et aéroélastiques d'EAV ont fait l'objet d'essais dans les soufflerie du CNRC. Les considérations de blocage de la soufflerie permettent de penser que l'on peut obtenir des données précises sur les performances de l'éolienne si la surface balayée par le rotor est inférieure à 10% de la section de la soufflerie. Cette limite restreint beaucoup les dimensions de la maquette et demande qu'on porte un soin particulier aux mesures, même aux mesures grossières des paramètres de performance (par exemple la puissance de sortie) ainsi qu'aux caractéristiques aérodynamiques. L'essai de maquettes aéroélastiques peut se faire sur une plus grande échelle; il faut donc habituellement au moins deux maquettes pour étudier complètement une configuration donnée.

Les soufflerie du CNRC sont à la disposition, sur rendez-vous, des industriels, sous réserve de l'approbation technique du personnel de recherche du CNRC, pour des essais de systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Les essais en soufflerie sont utiles pour évaluer des paramètres de conception dans des conditions bien connues et reproductibles. Toutefois, les soufflerie ne permettent pas de réaliser des essais en grandeur réelle, sur une gamme importante de conditions réelles. De

tels essais relèvent de l'Installation nationale d'essais des éoliennes, Centre de l'Atlantique dans l'Île-du-Prince-Édouard. Cette installation, d'une superficie de 150 acres à l'extrême point septentrionale de l'Île-du-Prince-Édouard dans le Golfe du Saint-Laurent, a été mise en service à la fin de 1980. Seize installations sont prévues et seront munies d'une source d'alimentation, de commandes et de connexions pour l'enregistrement des données. Les édifices permanents abritent des dispositifs d'acquisition des données et des commandes informatisées, des ateliers d'électronique et de mécanique, et des locaux d'urgence. Le CNRC financera l'exploitation du Centre de l'Atlantique jusqu'à ce qu'il s'autofinance.

Plusieurs projets sont actuellement en cours au Centre: évaluation des diminutions des performances due aux volets équatoriaux sur les pales des éoliennes Darrieus, essais de durabilité sur plusieurs petites éoliennes à axe horizontal et comparaisons détaillées des mesures de la vitesse du vent à partir de divers anémomètres.

4.2.6 Aspects écologiques

Jusqu'à maintenant, peu a été fait dans ce domaine. Des mesures du bruit ont été faites sur l'EAV des Iles de la Madeleine par des professionnels invités venant du SERI (États-Unis). On s'attend à ce que paraisse au cours de 1981 un rapport comparant les caractéristiques sonores des EAV et des EAH de dimensions similaires.

On s'est d'abord préoccupé de l'esthétique, des collisions avec les oiseaux, du givrage, de la corrosion par aspersion de sel et d'autres problèmes écologiques, mais aucune analyse ou expérience spécifique n'a été effectuée à date.

4.2.7 Normes

L'élaboration de normes de sûreté, de rendement et de durabilité des systèmes de conversion de l'énergie éolienne est commencée et elle a été confiée par contrat à l'Association canadienne de normalisation (ACNOR) qui établit des directives initiales à partir d'un consensus entre les représentants des utilisateurs, des fabricants et des organismes publics. La priorité a été donné au système éolien domestique (puissance de sortie inférieure à 100 kW) afin de donner un point de repère aux petits fabricants et acheteurs individuels. Il est prévu que les normes canadiennes et américaines seront compatibles, ce qui facilitera le commerce et les essais de conformité en Amérique du Nord.

4.3 Essais sur le terrain et aide technique à l'industrie

Des essais sur le terrain EAV ont été entrepris conjointement avec des utilisateurs potentiels afin de:

a) Fournir aux organismes de R et D des données de performance et de fiabilité concernant des prototypes EAV dans des conditions de fonctionnement réalistes.

b) Faire profiter les utilisateurs potentiels de l'expérience acquise dans le fonctionnement de ces nouveaux systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

c) Donner aux fabricants canadiens la chance de concevoir et d'évaluer ces systèmes.

Jusqu'à maintenant, les EAV à l'essai se répartissent dans les trois catégories d'utilisation de l'énergie éolienne esquissées au paragraphe 3.4, soit:

- applications à des fins spéciales (~1 kW)
- applications pour les communautés éloignées (~100 kW)
- applications à l'échelle nationale (~10000 kW).

4.3.1 Applications à des fins spéciales

L'intérêt de ces installations vient de l'initiative de Bristol Aerospace Limited qui, en 1976, a conçu un système aérogénérateur à axe vertical avec stockage en vue d'alimenter une station météorologique automatique à la dérive sur un banc de glace flottant dans la mer de Beaufort (fig. 6). L'éolienne se composait d'un rotor Darrieus à trois pales, muni d'augets Savonius sur l'axe pour le démarrage aérodynamique et le fonctionnement dans des conditions de très faibles vents. Un prototype de génératrice basse vitesse fut monté directement sur l'axe de l'aérogénérateur (sans système multiplicateur); il fournissait de l'électricité à une série d'accumulateurs qui alimentent les instruments météorologiques et le transmetteur radio. Le système a fonctionné de façon satisfaisante pendant un an et demi: après quoi la liaison avec le satellite a été interrompue et n'a pu être rétablie.

Les travaux de recherches et développement de Bristol sur les EAV, financés principalement par le programme pour les projets industrie-laboratoires du CNRC (PPIL), ont été fondées sur ce projet avant-gardiste. Deux autres modèles (systèmes B et C) ont été réalisés sur les mêmes principes pour couvrir la gamme des centrales aéroélectriques de puissance moyenne allant jusqu'à environ 1 kW en régime de vent modéré (voir tableau III). Un plus gros modèle, le système D, est en cours de conception mais on ne dispose pas encore du matériel.

Six modèles "B" et "C" de Bristol ont été installés chez des utilisateurs potentiels dans le cadre d'évaluations conjointes sur le terrain; les détails sont donnés dans le tableau III.

Actuellement tous ces systèmes sont revus en usine; on modifie certains joints des pales pour éviter la rupture à la fatigue dont a fait l'objet le rotor initial installé à Lumsden. Leur réinstallation est prévue en cours de l'été de 1981 et des données de la plupart des sites seront transmises quotidiennement par satellite, pour traitement, chez le fabricant à Winnipeg.

Pratt and Whitney Aircraft of Canada Limited a l'intention d'adapter et de commercialiser un aérogénérateur UTC à axe horizontal de 8 kW mis au point par Hamilton Standard.

Figure 6. Centrale EAV à Système "A" de Bristol sur de la glace à la dérive dans la mer de Beaufort (Nov. 76)

Tableau III
Spécifications des systèmes aéroélectriques de Bristol

Paramètres	Système A	Système B	Système C	Système D
CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME				
Gamme de puissances (W)	20-160	100-800	350-2800	1400 à 11200 ou 2700 à 22000
Vitesses correspondantes des vents (mi/h)	7-14	7-14	8-16	6-16, ou 10-20
Vitesses correspondantes de l'arbre (tr/min)	87-174	63-126	55-110	30-60, ou 38-76
Puissance moyenne récupérée à 10 mi/h (W)	10-75	50-300	200-3000	1000-10000
Capacité des accumulateurs (AH à volts)	250 à 12, à 9000 à 12	625 à 24, à 13500 à 24	100 à 48, à 1000 à 48	500 à 48, à 5000 à 48
Diesel	N	N	O	O
SPÉCIFICATIONS DE LA TURBINE				
Méthode de démarrage	Aérodynamique (rotors Savonius)			
Vitesse minimale du vent (pour produire de l'énergie* (mi/h)	7	7	8	8
Vitesse utile nominale du vent* (mi/h)	35	25	25	25
Vitesse maximale de fonctionnement (mi/h)	100	110	110	120

* mesurée dans le plan équatorial de la turbine

Tableau III (suite et fin)

Paramètres	Système A	Système B	Système C	Système D
DÉTAILS DU ROTOR				
Rapport hauteur/diamètre	1,0	1,2	1,6	1,5
Nombre de pales	3	2	2	3 (à confirmer)
Diamètre (pi)	8,7	15,5	19,9	45,6
Hauteur (pi)	8,7	18,6	31,9	68,4
Rapport T/C des pales (%)	15	12	12	18
Matériaux - Pale	Acier inoxydable			
- Démarreur	Aluminium			
- Arbre	Sans objet	Acier doux		

Tableau IV: Installations aéroélectriques expérimentales à des fins spéciales

Emplacement	Agent partenaire	Système	Objet	Date de mise en service
Calgary (Alberta)	Shell Oil Ltd.	C	Protection cathodique des conduites	Mai 1979
Edmonton (Alberta)	Alberta Gov't Telephone	B	Relais de télé-communications	Juillet 1979
Lumsden (Saskatchewan)	Saskatchewan Telephone	C	Relais de télé-communications	Juin 1979
Maryborough (Ontario)	Télécommunica-tions CN/CP	C	Relais de télé-communications	(Août 1981)
Sackville (Nouveau-Brunswick)	Société Radio-Canada	B	Émetteur	(Août 1981)
Saint-Jean (Terre-Neuve)	Newfoundland Telephone	C	Relais de télé-communications	(Août 1981)

Cette classe de machines est promis à un marché potentiel important, celui des télécommunications dans les pays en voie de développement ainsi que dans les régions éloignées du Canada.

4.3.2 Systèmes hybrides éoliens-diesels

Des études ont montré que, pour de très petites centrales aéroélectriques, le stockage dans des accumulateurs s'avère un moyen rentable d'assurer un approvisionnement régulier à partir de l'énergie éolienne intermittente. Toutefois, pour les systèmes plus importants, il est actuellement plus rentable d'utiliser un système d'appoint tel qu'un groupe diesel électrogène automatique, qui fonctionne sur demande. Par ailleurs, de nombreuses collectivités éloignées du Canada disposent déjà de groupes électrogènes de plus en plus onéreux. Les coûts types de production sont de l'ordre de 10 à 15¢ le kWh, et dans les régions très éloignées, de 40¢ et plus le kWh.

Par conséquent, on envisage avec enthousiasme l'examen des différents ensembles mixtes, éoliennes et moteurs diesel, qui peuvent produire de l'énergie. Diverses configurations ont fait l'objet d'études (référence 14), et des recherches expérimentales préliminaires ont été menées sur un système éolien diesel de 10 kW à Toronto en 1978.

Une évaluation détaillée reposant sur ces résultats est prévue pour 1981-82, dans laquelle une EAV de 50 kW sera mécaniquement reliée à un groupe électrogène de 60 kW, dans une centrale prototype éloignée de 100 kW. Le projet, conjointement parrainé par le CNRC, le Ministère ontarien de l'Énergie et Ontario Hydro, sera exécuté par DAF Indal Limited, fabricant de l'éolienne. On procèdera à l'étalonnage précis de chaque élément de la centrale ainsi qu'à l'évaluation détaillée des effets de l'éolienne sur le cycle de travail du moteur diesel en fonction de la charge et des répercussions sur l'économie de combustible et l'entretien du moteur diesel.

4.3.3 Installations de 50 kW reliées au réseau

Le CNRC a acheté quatre EAV de 50 kW de DAF Indal Limited afin de les évaluer sur le terrain conjointement avec les compagnies provinciales d'électricité (fig. 7). Les objectifs de ces projets sont de fournir des données d'exploitation réalistes pour vérifier les méthodes de conception, et de permettre au personnel des compagnies d'acquérir l'expérience voulue sur le fonctionnement et l'entretien de ces nouvelles centrales.

Ces systèmes se composent d'un rotor à vitesse constante de type Darrieus de 17 m × 11 m, monté sur une tour de 10 m et supporté par des haubans, un système multiplicateur, une génératrice à induction de 60 Hz, et des commandes de fonctionnement automatique et de sécurité. Ils sont directement reliés au moyen de transformateurs appropriés au réseau local de distribution de l'électricité qui fait office de charge "infinie" susceptible d'absorber ce qu'ils produisent.

L'éolienne moderne de Holyrood à axe vertical moderne est celle qui a fonctionné le plus longtemps. En février 1981, elle avait enregistré plus de 4000 h de fonctionnement. Toutefois les facteurs de disponibilité et d'utilisation sont beaucoup trop faibles, et des installations plus récentes ont permis de faire mieux plus rapidement et avec moins d'accrochages. On projète actuellement d'améliorer l'installation de Holyrood pour qu'elle corresponde aux normes actuelles (principalement quant aux commandes et accessoires).

La machine de Swift Current, en plus des instruments habituels de monitorage des performances, a été fortement équipée de jauges de contrainte pour monitorer les forces fixes et variables en vue de faire des comparaisons avec les techniques d'analyse de la dynamique des structures utilisées lors de la conception (voir paragraphe 4.2.3). Le roulement supérieur de cette machine a grippé lors d'une tempête de vent en 1979 et il a fallu remplacer le rotor; les essais ont repris vers la fin de 1980.

Les centrales de Churchill et de Victoria utilisent un système de freinage et multiplication à un seul rapport de 15:1, et un rotor sur une suspension hydraulique permettant de régler la tension des haubans. Une attention particulière sera portée au fonctionnement de ces systèmes dans des conditions de froid extrême prolongées et de fortes tempêtes de neige à Churchill.

Tableau V: Installations d'essai sur le terrain de systèmes aéroélectriques de 50 kW reliés au réseau

Situation géographique	Partenaire	Mise en service
Holyrood (Terre-Neuve)	Newfoundland et Labrador Hydro	Juin 1978
Swift Current (Saskatchewan)	Saskatchewan Power Corp.	Août 1978
Victoria (Colombie-Britannique)	B.C. Hydro	Novembre 1980
Churchill (Manitoba)	Churchill Research Center	(Septembre 1981)

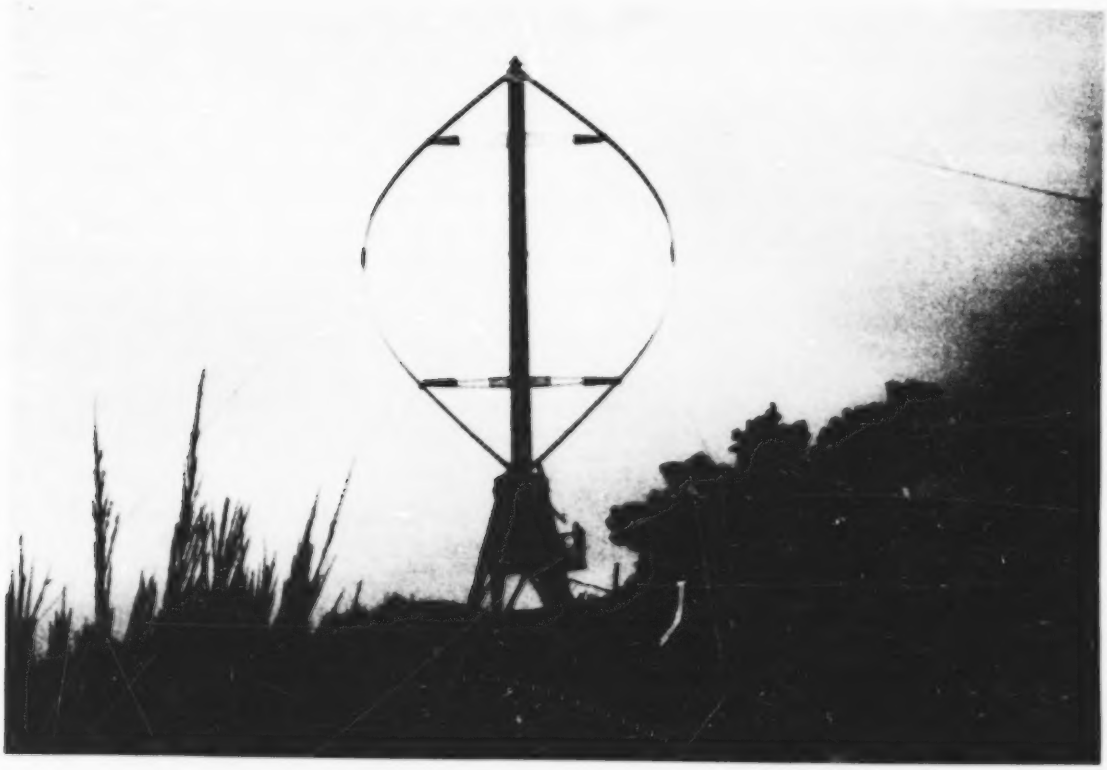


Figure 7 EAV de 50 kW couplée au réseau à Victoria (C.-B.)

Ces machines de 50 kW peuvent être considérées comme des prototypes d'unités plus importantes qui, si elles sont rentables, seraient installées en réseaux par les compagnies d'électricité afin d'apporter une contribution importante (disons 20%) au réseau électrique dans les régions venteuses du Canada. Les machines de 50 kW promettent ainsi de combler les demandes modérées des zones éloignées sous la forme d'approvisionnements intermittents (p. ex. pour l'irrigation) de compléments aux systèmes de stockage ou d'appoint (voir paragraphe 4.3.2).

4.3.4 Installation des Iles de la Madeleine

L'éolienne de ce projet conjoint avec Hydro-Québec a été pendant plusieurs années la plus grande EAV au monde. (ALCOA au États-Unis détient maintenant cet honneur, jusqu'à ce que ÉOLE soit érigé - voir paragraphe 10.0). Le rotor de type Darrieus de 37 m × 25 m est monté sur une tour de 10 m et supporté par quatre haubans. Un système à courroie et engrenages multiplie la vitesse du rotor de 36 tr/min à 720 tr/min, vitesse de fonctionnement de la génératrice à induction de 230 kW qui est couplée via des transformateurs et des commutateurs au réseau de 56 MW des Iles de la Madeleine (figure 8). Cette machine a été conçue pour fonctionner de façon entièrement automatique bien qu'elle ait toujours été contrôlée jusqu'à maintenant.

Cette éolienne expérimentale a été érigée et mise en service en 1977. Comme l'EAV de 50 kW de Swift Current, l'installation des Iles de la Madeleine a été bien pourvue en instruments afin de recueillir des données sur les performances et les contraintes. Les essais préliminaires ont été effectués à différentes vitesses de rotation allant jusqu'à 31 tr/min (soit 86% de la vitesse théorique de conception) en changeant le rapport de transmission. Un malheureux accident s'est produit en juillet 1978: le rotor s'est effondré. Des recherches ultérieures ont montré que l'accident n'était pas dû à des erreurs de conception ou à une défaillance de la structure du rotor car ce dernier et les haubans sont restés intacts pendant une heure de fonctionnement à une vitesse excessive (jusqu'à environ deux fois la vitesse nominale de fonctionnement).

Le rotor a été reconstruit avec pratiquement les mêmes spécifications que le rotor original et monté sur la tour avec le système de transmission original. Les essais ont repris au printemps de 1980 et les données à 31 tr/min ont été confirmées. À l'automne de 1980, le système à courroie d'entraînement a été modifié pour permettre un fonctionnement à pleine vitesse soit 36 tr/min. Les essais jusqu'à maintenant ont couvert la plus grande partie de la gamme des vitesses opérationnelles des vents, et le rendement dépasse légèrement les prévisions théoriques (figure 9). De nombreuses données provenant des jauges de contrainte ont été enregistrées afin d'examiner les modes de vibration et l'importance des contraintes.

L'EAV des Iles de la Madeleine est encore jugée comme une installation expérimentale, et son objectif premier est d'être sur ouvrage d'essai d'échelle moyenne à partir duquel on puisse déterminer des caractéristiques de fonctionnement valables dans les méthodes de

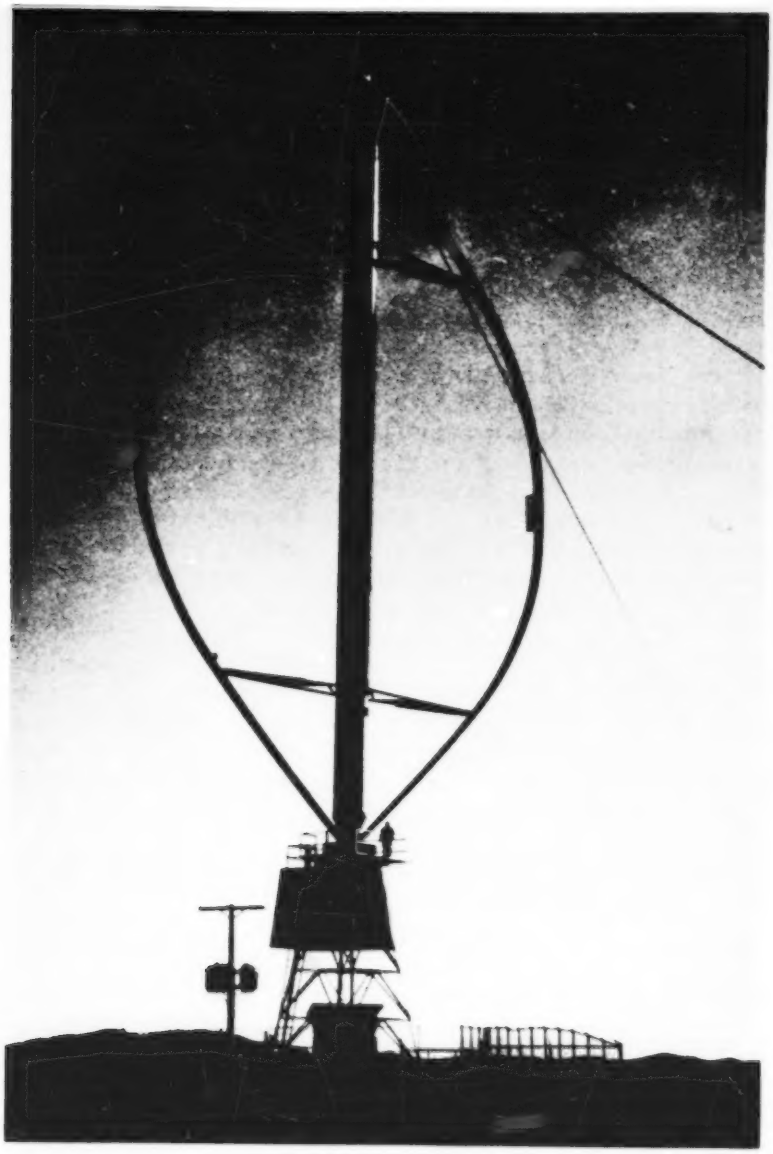


Figure 8 EAV de 230 kW couplée au réseau aux Iles de la Madeleine (Québec)

conception. On prévoit dans le courant de l'été 1981 une série d'expériences pour vérifier les analyses de dynamique des structures et de modélisation des systèmes qui seront utilisées pour la conception d'ÉOLE.

4.4 Projet ÉOLE

Le projet ÉOLE est un projet à frais partagés entre Hydro-Québec (H-Q) et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) pour concevoir, construire et évaluer un prototype d'éolienne à axe vertical de l'ordre du mégawatt. L'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) et le CNRC assurent la direction technique du projet, et H-Q gère et exécute le projet sous la direction de l'IREQ et du CNRC.

4.4.1 Historique

Au début des années 70, l'IREQ a commencé des études sur des éoliennes avec système de stockage sous forme d'air comprimé constituant un dispositif d'approvisionnement en énergie et de régularisation de la charge. Des travaux expérimentaux ont été effectués sur des éoliennes à axe tant horizontal que vertical de type de faible solidité, à haute vitesse de rotation et à pales aérodynamiques. L'IREQ et le CNRC ont décidé indépendamment qu'il était nécessaire de construire une machine de quelques centaines de kilowatts de puissance maximale pour confirmer les promesses que laissait planer la configuration à axe vertical suite à des analyses et des essais sur maquette antérieurs. Ce projet conjoint a débouché sur la construction de l'EAV de 230 kW expérimentale, installée aux Iles de la Madeleine dans le Golfe St-Laurent.

Pour confirmer les projections concernant la conception, les techniques de fabrication et les coûts de systèmes plus importants, on a lancé un appel d'offre en vue d'une ÉTUDE DE CONCEPTION traitant de ces aspects pour une gamme de plusieurs paramètres de conception importants des EAV couplées à un réseau. Des quatre offres reçues, celle de la Shawinigan (avec Canadair et L'IREQ) a été retenue.

L'ÉTUDE DE CONCEPTION a examiné la conception et le coût de 72 systèmes dont les paramètres se situent dans les fourchettes suivantes:

Surface balayée (A):	1000 à 8000 m^2
Rapport de la hauteur du rotor à son diamètre (H/D):	1,0 à 2,0
Rapport de la corde de la pale au rayon du rotor (Nc/R):	0,05 à 1,0
Nombre de pales (N):	1, 2 et 3
Rapport de la hauteur équatoriale à la hauteur du rotor (He/H):	0,5 à 1,0
Rapport de la puissance installée à la puissance du vent:	0,5 à 2,0

Des conditions ont été fixées pour le régime des vents; on a supposé trois conditions générales des sols pour déterminer les conditions d'ancrage; un site spécifique (à Terre-Neuve) a été choisi afin d'établir les coûts de transport et de construction; et un scénario d'exploitation de 200 unités pendant 10 ans a été défini. Le rapport de l'ÉTUDE DE CONCEPTION de la Shawinigan (réf. 10), publié en septembre

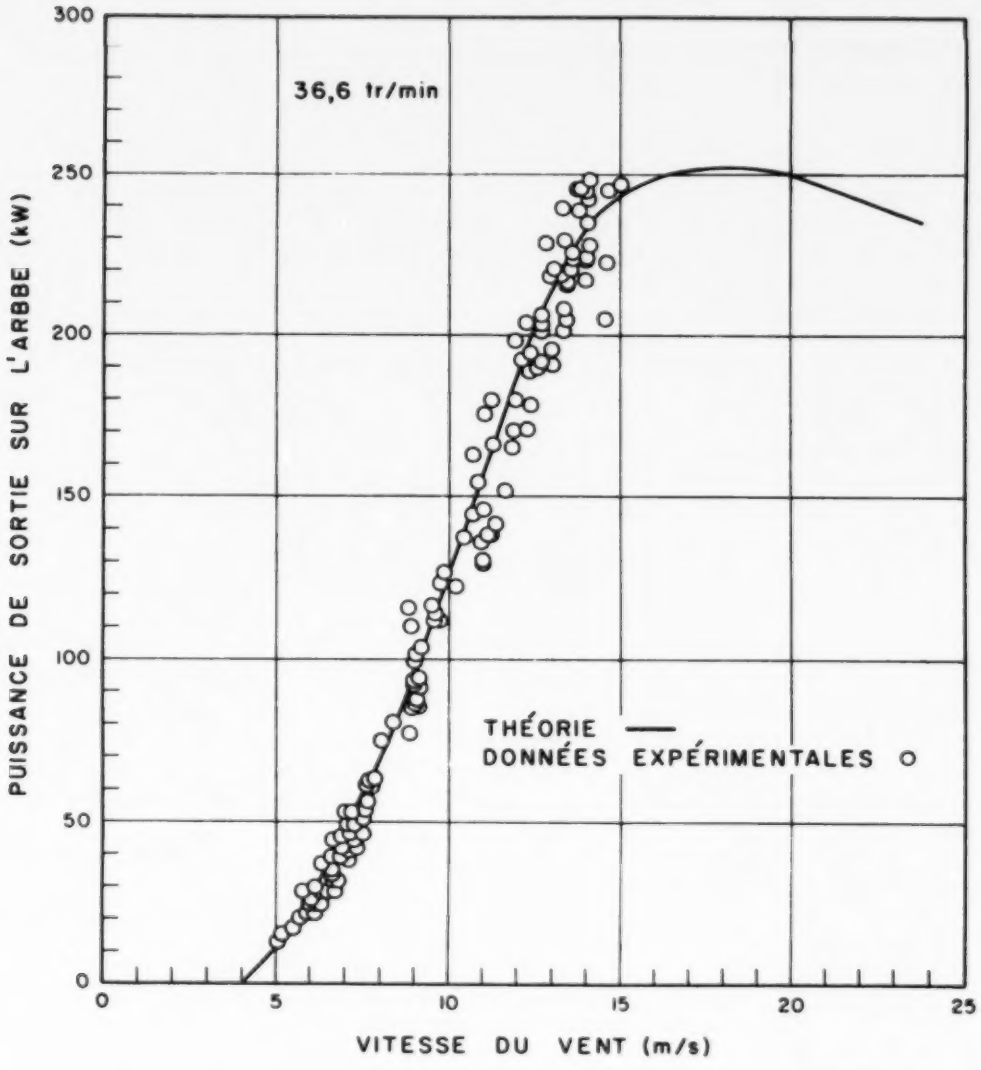


Figure 9 Performance de l'EAV des Iles de la Madeleine

1978, conclut que, même pour les cas pessimistes considérés (avec un scénario de production limitée), l'énergie électrique produite par des EAV de l'ordre du mégawatt couplées au réseau coûterait de 3 à 4¢ le kWh. Le rapport recommande aussi la construction et la mise d'une EAV prototype de l'ordre du mégawatt pour confirmer sa faisabilité technique et pour examiner les caractéristiques opérationnelles et économiques d'une telle machine couplée au réseau d'électricité.

Après considération du rapport et discussion avec l'IREQ, le CNRC a chargé la Shawinigan de préparer une DÉFINITION DU PROJET pour évaluer les conditions, le calendrier et les coûts de conception, de construction et d'essai d'un prototype d'EAV de l'ordre du mégawatt; le

rapport a été déposé en juillet 1979 (réf. 13a). À la suite de discussions avec le CNRC et l'IREQ et d'évaluations indépendantes, il a été proposé que le CNRC et Hydro Québec entreprennent conjointement le projet sur une base de partage égal des coûts.

Une étude importante a été entreprise en 1979 par l'IREQ pour comparer les EAV de l'ordre du mégawatt et les éoliennes classiques à axe horizontal. Le CNRC et EMR se sont joints ultérieurement pour parrainer et diriger cette étude qui revoit la technologie des éoliennes du point de vue des compagnies d'électricité, en mettant l'accent sur les mérites techniques et économiques relatifs des EAH et des grosses EAV projetées. L'étude, exécutée par la Shawinigan, a été subventionnée par Canadair et l'IREQ. Elle repose en grande partie sur la technologie brevetée des grosses éoliennes américaines. Les résultats de cette étude poussée ont fait l'objet d'un rapport en trois volumes, présentés par la Shawinigan au cours de 1979 et 1980, et condensé dans un rapport à la direction (référence 15d). L'étude comparative a permis de conclure que les EAV présentent des avantages techniques inhérents par rapport aux EAH et peuvent leur être économiquement supérieures quant au coût de l'énergie.

Les données contenues dans la DÉFINITION DU PROJET ont été mises à jour en juin 1980 (réf. 13b) avant que le gouvernement fédéral n'approuve le financement de la moitié des dépenses de conception et de réalisation du prototype de l'ordre du mégawatt - nommé projet ÉOLE. Les coûts totaux et les liquidités ont été estimés à compter des 1er juillet et 1er octobre 1980 comme date de départ. Ces données sont celles visées par les soumissions du CNRC au cabinet fédéral qui ont été approuvées le 15 janvier et annoncées par le ministre chargé des Sciences et de la Technologie le 17 janvier 1981.

4.4.2 Objectifs

Voici les principaux objectifs du projet ÉOLE:

- confirmer la faisabilité technique des systèmes aérogénérateurs EAV de l'ordre du mégawatt

- évaluer la conception et déterminer les caractéristiques de fonctionnement, de performance et de commande des systèmes aérogénérateurs EAV de l'ordre du mégawatt, et établir leurs interactions avec le réseau électrique récepteur

- vérifier les techniques d'analyse utilisées pour prévoir les performances techniques et indiquer le potentiel économique des EAV de l'ordre du mégawatt

- transférer les connaissances et l'expérience pertinentes aux utilisateurs et aux fabricants canadiens de systèmes aérogénérateurs EAV

- encourager et promouvoir le développement de la production industrielle au Canada de systèmes aérogénérateurs EAV et de leur composants

- examiner les aspects écologiques des systèmes aérogénérateurs EAV de l'ordre du mégawatt

4.4.3 Esquisse du projet

- le projet ÉOLE comprend les activités principales suivantes:

DÉFINITION TECHNIQUE, notamment:

- revue des connaissances actuelles, études existantes, etc.

- énumération des paramètres et des considérations de conception

- établissement du cadre des études nécessaires pour définir certains paramètres de conception

CONCEPTION PRÉLIMINAIRE, notamment:

- analyses et essais pour évaluer les paramètres de conception

- définition des spécifications techniques initiales

- établissement de calendriers détaillés, d'estimations et de prévisions des liquidités pour le projet

- évaluation des sites d'implantation

CONCEPTION DÉTAILLÉE; notamment:

- choix du site

- conception industrielle détaillée, analyses techniques et économiques et essais

- définition des spécifications techniques finales

RÉALISATION, notamment:

- approvisionnement, fabrication, assemblage et montage de l'éolienne ÉOLE

ÉVALUATION, notamment:

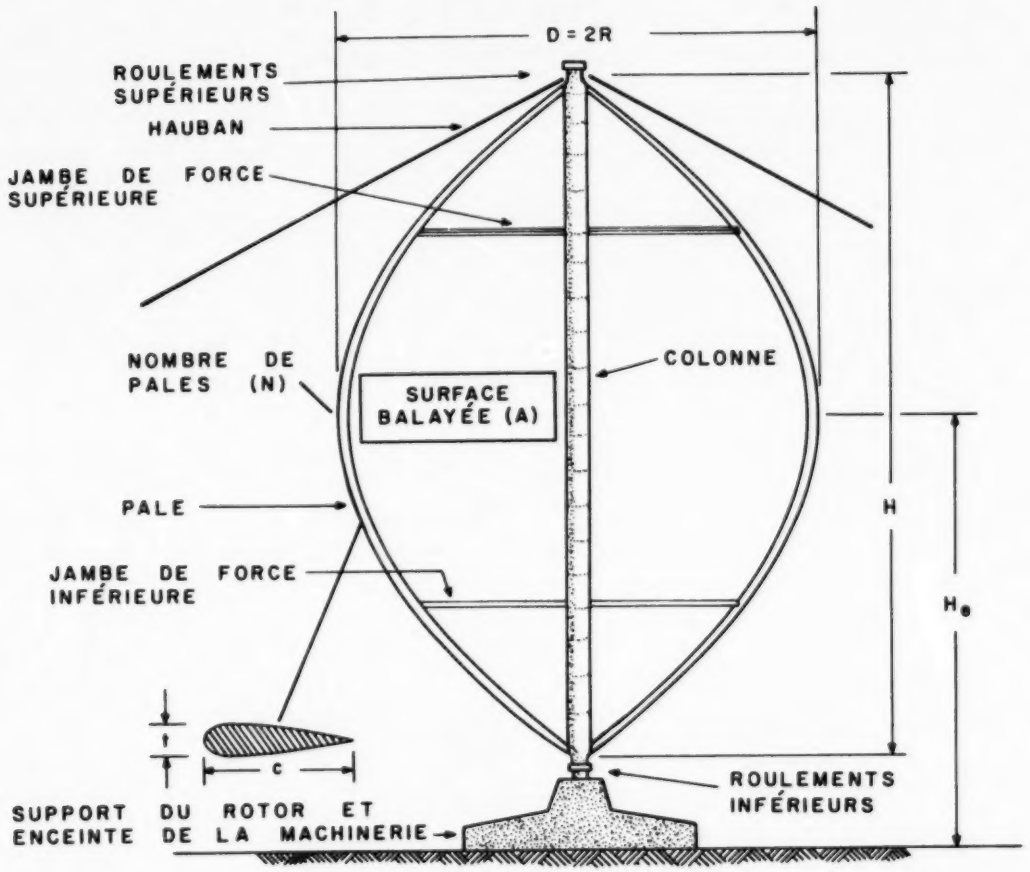
- mise en service, essai, évaluation et rapport sur les essais techniques et économiques d'ÉOLE

On s'attend à ce que le projet dure environ quatre ans soit une année pour la conception détaillée, une deuxième année pour la

construction, et deux années pour la mise en service et l'évaluation du fonctionnement. Le coût total du projet se situerait aux environs de $35 millions, incluant les coûts de mise au point des techniques de conception qui seront applicables à d'autres EAV de l'ordre du mégawatt. Des calendriers détaillés et des estimations des coûts sont préparés par Hydro-Québec.

4.4.4 Spécifications préliminaires

Voici les spécifications préliminaires (tableau VI et figure 10) qui ont été établies pour le projet ÉOLE à partir des études préliminaires présentées dans les paragraphes précédents.



A = 4000 m^2	N = 2
H = 96 m	t = 0.43 m
D = 64 m	c = 2.4 m

Figure 10. ÉOLE - Spécifications préliminaires

Tableau VI: Spécifications préliminaires du projet ÉOLE

Surface balayée (A)	4000 m^2
Nombre de pale (N)	2 à 180°
Rapport hauteur/diamètre (H/D)	1,50
Solidité (Nc/R)	0,15
Rapport de l'altitude équatoriale à la hauteur du rotor (H_e /H)	Minimum
Profil des pales	NACA 0018
Jambes de force	2
Volet	Aucun
Freins: - nombre de systèmes indépendants	2
- arbre du frein principal	Basse vitesse
- verrouillage séparé pour la mise en drapeau du rotor	Oui
Forme du rotor	Troposkien nominal
Régime des vents pour la conception préliminaire - vitesse moyenne à 50 m au-dessus du sol	9 m/s
- facteur de Weibull (k)	2,0
- coefficient de cisaillement (α)	0,17
Durée d'exploitation	30 ans
Qualité de l'energie	Conforme aux normes d'Hydro-Québec
Modes de fonctionnement normal et d'urgence	Selon les pratiques d'Hydro-Québec
Fonctionnement au cours des pertes d'énergie dans le réseau	Arrêt sécuritaire seulement
Possibilité de "Black-start"	Aucune
Modes de commande :	
- entièrement automatique (sans surveillance)	Oui
- commande manuelle avec protection complète	Oui
Dégivrage et protection antigivrage	Aucune - détection et arrêt

Ces paramètres sont sujets à modifiction en cours de conception.

5.0 CONCLUSION

La technologie actuelle des EAV se trouve au même stade de développement qu'était l'automobile avant l'introduction du modèle T de Ford. On a établi que le principe est bon. Des modèles expérimentaux et quelques prototypes de préproduction ont permis de vérifier les caractéristiques fondamentales de fonctionnement. Des techniques de fabrication ont été mises au point et éprouvées pour des éoliennes allant jusqu'à ¼ MW. Des projections concernant les coûts pour de production de quantités réalistes augurent la rentabilité économique des EAV. Néanmoins, de nombreux points techniques importants nécessitent encore d'autres recherches.

Le plus grand point à éclaircir est celui de la fiabilité de la structure des EAV. Le rotor EAV est une structure aéroélastique dynamique extrêmement complexe. Les interactions entre le rotor et le système fixe de support compliquent sérieusement l'analyse des modes de vibration et des contraintes dynamiques. Des analyses techniques de prévision des modes fondamentaux et des fonctions de contrainte sont en cours au CNRC, dans les ministères utilisateurs des EAV et sous contrat dans l'industrie canadienne. On prévoit des prolongements de ces travaux sous la forme d'analyses des modes de défaillance et de programmes d'assurance de la fiabilité. Ces techniques d'analyse doivent ensuite être vérifiées, d'abord sur des modèles physiques simples et éventuellement par des mesures sur le terrain sur de vraies EAV. L'information recherchée est essentielle pour s'assurer de la fiabilité des éoliennes.

On a besoin de programmes de simulation des EAV pour permettre l'examen détaillé d'autres solutions aux problèmes du système de transmission et du système de commande, notamment pour réaliser la liaison avec le réseau électrique. Les EAV expérimentales, fortement équipées peuvent être d'une grande utilité pour vérifier ces techniques d'analyse.

Jusqu'à maintenant, les essais sur le terrain ont porté seulement sur des éoliennes individuelles, bien que l'on prévoit qu'une forte proportion de l'énergie éolienne proviendra de réseaux de telles machines. Il est donc nécessaire de déterminer les effets des interactions aérodynamiques et électriques entre les éléments du réseau, et avec le réseau électrique qu'ils alimentent.

Des noyaux de spécialistes en génie éolien commencent à se former au sein de plusieurs entreprises canadiennes qui pourraient trouver des débouchés rentables pour la conception et la fabrication d'éoliennes. Ces groupes ont, jusqu'à maintenant, acquis la technologie directement des scientifiques du CNRC dans le cadre du programme de RDEE. Pour devenir des groupes autonomes, ils ont besoin d'une aide pour développer leurs techniques fondamentales d'analyse et d'expérimentation. Les projets à forfait constituent un moyen efficace d'éprouver et de renforcer leurs compétences.

Au fur et à mesure que la technologie des SCEE progresse, il faut aussi que se développent des méthodes d'identification et d'évaluation des sites d'implantation. Il faut mettre au point des méthodes d'analyse numériques, statistiques et autres méthodes pour augmenter l'étendue des mesures météorologiques actuelles en harmonie avec la collecte des données sur des sites spécifiques. Actuellement, les travaux du SEA dans ce domaine constituent aussi sa principale mission officielle internationale dans le cadre du programme de RDEE.

La décision de poursuivre les travaux sur les EAV expérimentales de l'ordre du mégawatt est la principale étape à franchir dans le programme de RDEE. ÉOLE est un projet à frais partagés entre le CNRC et Hydro-Québec dans lequel la conception et la fabrication, le montage, la mise en service et les essais sont effectués par des entreprises canadiennes. Pour ce projet le programme de RDEE fournira une aide technique et administrative.

ANNEXE A

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

1. PRELIMINARY TEST OF A HIGH SPEED VERTICAL AXIS WINDMILL MODEL

P. South et R.S. Rangi
Conseil national de recherches du Canada
(LTR-LA-74) mars 1971

2. A WIND TUNNEL INVESTIGATION OF A 14 FT. DIAMETER VERTICAL AXIS WINDMILL

P. South et R.S. Rangi
Conseil national de recherches du Canada
(LTRA-LA-105) septembre 1972

3. WIND POWER AND THE VERTICAL-AXIS WIND TURBINE DEVELOPED AT THE NATIONAL RESEARCH COUNCIL

R.S. Rangi, P. South et R.J. Templin
Établissement aéronautique national du Conseil national de recherches. Tiré à part du Bulletin trimestriel n° 1974(2) de la DGM/EAN.

4. AERODYNAMIC PERFORMANCE THEORY FOR THE NRC VERTICAL-AXIS WIND TURBINE

R.J. Templin
Conseil national de recherches du Canada
(LRT-LS-160) juin 1974

5. AN ESTIMATE OF THE INTERACTION OF WINDMILLS IN WIDE-SPREAD ARRAYS

R.J. Templin
Conseil national de recherches du Canada
(LTR-LA-171) juin 1974

6. AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A 12 FT. DIAMETER HIGH SPEED VERTICAL-AXIS WIND TURBINE

P. South et R.S. Rangi
Conseil national de recherches du Canada
(LTR-LA-166) avril 1975

7. THE DESIGN OF HIGH-SPEED WINDMILLS SUITABLE FOR DRIVING ELECTRIC GENERATORS (Révision du Rapport n° PAA-32, Ottawa, 14 juin 1937)

G.J. Klein
Conseil national de recherches du Canada
(LTR-LA-183) août 1975

8. CANADIAN WIND ENERGY PROGRAM

R.J. Templin et P. South
Laboratoire d'aérodynamique des basses vitesses,
Conseil national de recherches du Canada. Préparé pour Vertical Axis Wind Turbine Technology Workshop tenu à Albuquerque, New Mexico, du 18 au 29 mai 1976

9. SOME DESIGN ASPECTS OF HIGH-SPEED VERTICAL-AXIS WIND TURBINES

R.J. Templin et P. South
Conseil national de recherches du Canada
Préparé pour l'International Symposium on Wind Energy Systems, tenu du 7 au 9 septembre 1976

10. DESIGN STUDY : LARGE CAPACITY VERTICAL AXIS WIND TURBINE GENERATORS

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, septembre 1978

11. ESSAI SUR LE TERRAIN DE L'EAV DES ILES DE LA MADELEINE

P. South
Conseil national de recherches du Canada
Albert Watts
I.R.E.Q.
Article présenté à l'U.S. Dept. of Energy Workshop "Operational and Economic Status and Requirements of Large Scale Wind Systems", Monterey, Californie, mars 1979

12. DESIGN CHARACTERISTICS OF THE 224 kW MAGDALEN ISLANDS VAWT

R.J. Templin
Conseil national de recherches du Canada
Article présenté à l'U.S. Dept. of Energy "A Workshop on Large Wind Turbine Design Characteristics and R & D Requirements", NASA/Lewis Research Centre, Cleveland, Ohio, avril 1979

13a. PROJECT DEFINITION WORK - Pour le développement industriel, la conception, l'approvisionnement, la construction, les essais et l'évaluation d'un prototype de centrale éoliene à axe vertical de surface balayée par le rotor de 4000 m^2.

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, juillet 1979

13b. SUPPLEMENT TO PROJECT DEFINITION WORK (1980) - Pour le développement industriel, la conception, l'approvisionnement, la construction, les essais et l'évaluation d'un prototype de centrale éolienne à axe vertical de surface balayée par le rotor de 4000 m^2.

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, juin 1980

14. WIND/DIESEL HYBRID DEMONSTRATION PROJECT PHASE 1 REPORT - CONCEPTUAL STUDIES

DAF Indal Limited, août 1979

15a. ÉTUDE DES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS POUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE - PHASE I

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, décembre 1979

15b. ÉTUDE DES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS POUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE - PHASE II

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, décembre 1979

15c. STUDY OF LARGE WIND TURBINE GENERATORS FOR ELECTRIC POWER GENERATION - PHASE III

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, juillet 1980

15d. STUDY OF LARGE WIND TURBINE GENERATORS FOR ELECTRICAL POWER GENERATION - EXECUTIVE SUMMARY

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, juillet 1980

16. STUDY OF WIND TURBINE GENERATOR POWER TRAIN OPTIMIZATION (Rapport d'une étude pour l'Association canadienne de l'électricité)

Société d'Ingénierie Shawinigan Limitée, août 1979

17. RENEWABLE ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT IN CANADA

M.S. Chappell
Bureau du projet Énergie, Conseil national de recherches du Canada (CNRC n° 1979), décembre 1979

18. EFFECT OF DESIGN VARIABLES ON WIND TURBINE PERFORMANCE

R.J. Templin
Conseil national de recherches du Canada
Note technique sur l'énergie éolienne, TM-WE-001, janvier 1981

19. CALIBRATION AND TESTING OF THE DAF INDAL WIND HISTOGRAM

P. Penna
Conseil national de recherches du Canada
Note technique sur l'énergie éolienne, TM-WE-002, janvier 1981

20. PROCEEDINGS OF THE WIND ENERGY RESOURCE ASSESSMENT SEMINAR (WERAS 80)

Compilé par S.L. Bolcso, Coordonnateur du colloque
Conseil national de recherches du Canada
Note technique sur l'énergie éolienne, TM-WE-003, novembre 1980

21. PRELIMINARY STUDY TO COMPARE DARRIEUS WIND TURBINE SYSTEMS WITH GEAR-DRIVEN ALTERNATORS TO SYSTEMS WITH DIRECT-DRIVEN ALTERNATORS AND STATIC FREQUENCY CONVERTERS

Eric Whiteley, P. Eng.
Sous contract avec le Conseil national de recherches du Canada
Note technique sur l'énergie éolienne, TM-WE-004, novembre 1980

22. MEASUREMENTS ON THE MAGDALEN ISLANDS VAWT AND FUTURE PROJECTS (Communications présentées à la Fifth Biennial Wind Energy Conference and Workshop, Washington, DC)

R.J. Templin et R.S. Rangi
Conseil national de recherches du Canada
Note technique sur l'énergie éolienne, TM-WE-006, octobre 1981

23. THE WIND PROGRAM IN CANADA (Communications présentées à la Fifth Biennial Wind Energy Conference and Workshop, Washington, DC)

M.S. Chappell
Conseil national de recherches du Canada
Note technique sur l'énergie éolienne, TM-WE-007, octobre 1981

24. AESTHETIC FACTORS AND VISUAL EFFECTS OF LARGE-SCALE WECS. Rapport final du Groupe d'étude A5 de l'AIE dans le cadre de l'Accord de mise en oeuvre de la R&D dans SCEE

Publié par Steffan Engstrom and Bengt Pershagen
National Swedish Board for Energy Source Development,
Rapport NE 1980: le 20 juillet 1980

25. IEA LARGE SCALE WECS ANNUAL REPORT 1980. Rapport annuel de l'Accord de mise en oeuvre des SCEC de AIE

Préparé par Lars Rey and Bengt Pershagen
National Swedish Board for Energy Source Development,
Rapport NE 1981: le 1er janvier 1981